

**ГОДОВОЙ ОТЧЕТ  
о деятельности  
Научно-исследовательского Центра  
электрофизических и тепловых процессов  
ОИВТ РАН в 2016 г.**

Руководитель Центра  
Э.Е.Сон

# 1. Теплофизические свойства газов и плазмы

# 1.1.Создание базы данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ с веб-интерфейсом «ИВТАНТЕРМО-ОНЛАЙН»

## Основные характеристики

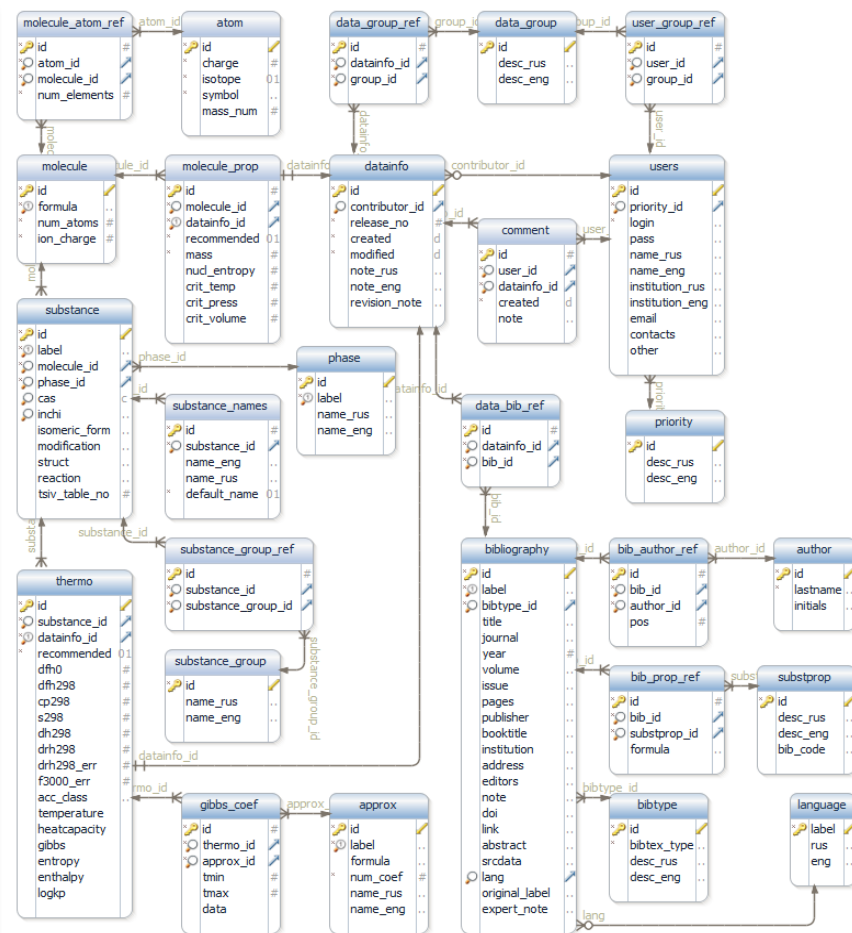
- Основу составляет банк данных «ИВТАНТЕРМО», содержащий свойства более 3400 веществ из 96 элементов, полученных на основе критического анализа экспериментальных данных
- Поиск по химическим формулам, названиям веществ и CAS-номерам
- Современный интерактивный веб-интерфейс, возможность удаленной работы пользователей и экспертов
- Поддержка контроля версий, сохранение информации о внесенных изменениях
- Возможность расширения и интеграции с другими базами данных ОИВТ РАН
- Библиографическая информация и комментарии экспертов

The screenshot displays the IVTANTHERMO web interface. At the top, the title "ИВТАНТЕРМО" is visible. Below it, the text "Банк данных по теплофизическим свойствам" is shown. A red box highlights the "Возможности:" section, which includes "Теплофизические свойства для более 1000 веществ" and "Расчет равновесного состава". A search dropdown menu is open, showing a list of chemical formulas such as H<sub>2</sub>O(g), AlH<sub>3</sub>(g), and others. Below the menu, a periodic table is displayed with elements color-coded by groups. A message at the bottom of the interface reads: "Пожалуйста, выберите химический элемент для получения списка доступных веществ".

# 1.2. Разработка архитектуры и наполнение базы данных по индивидуальным свойствам веществ с сетевым интерфейсом «ИВТАНТЕРМО-ОНЛАЙН»

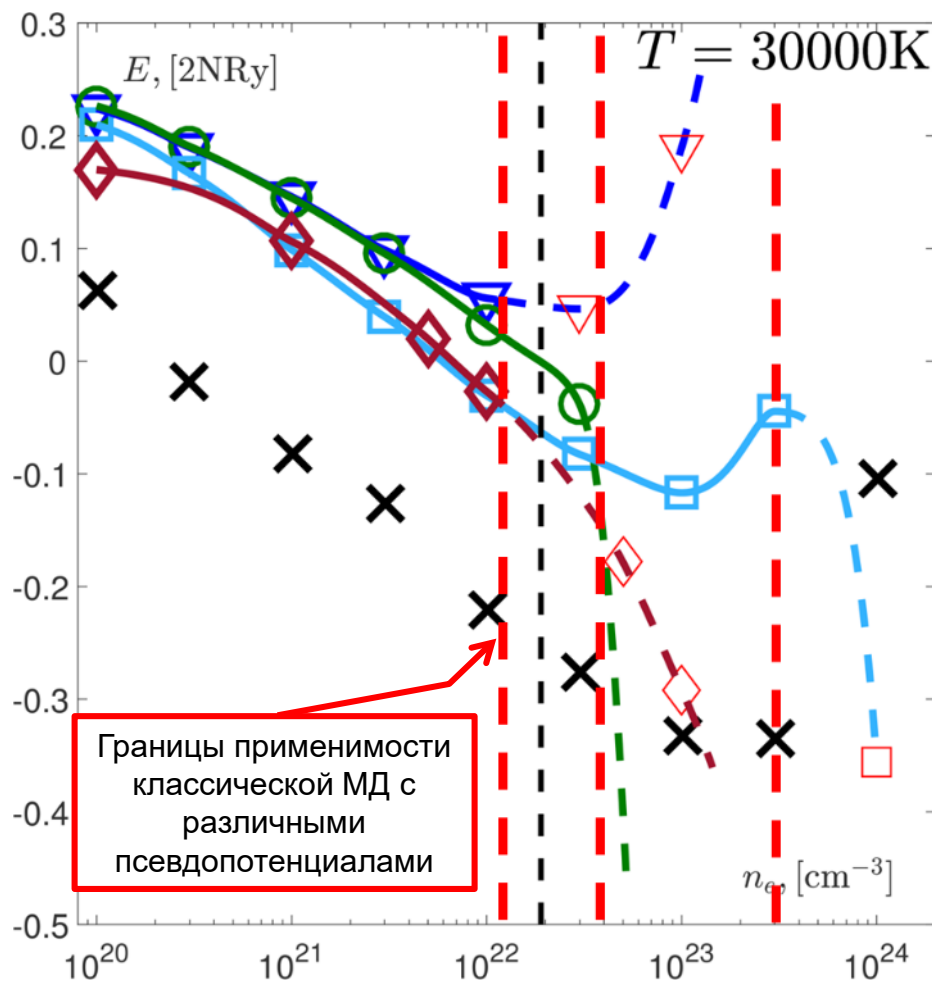
## Основные характеристики БД

- Свойства более 1000 веществ, полученных на основе критического анализа экспериментальных данных
- Поиск по химическим формулам, названиям веществ и CAS-номерам
- Современный интерактивный веб-интерфейс, возможность удаленной работы пользователей и экспертов
- Поддержка контроля версий, сохранение информации о внесенных изменениях
- Возможность расширения и интеграции с другими базами данных ОИВТ РАН (ударно-волновые эксперименты)
- Библиографическая информация и комментарии экспертов





# 1.3. Определение области применимости классической молекулярной динамики и молекулярной динамики с волновыми пакетами для моделирования неидеальной плазмы



▽ – Coul-Erf

○ – Erf-Erf

□ – Kelbg

× – PIMC [1]

◇ – WPMC

V. S. Filinov, M. Bonitz, V. E. Fortov, W. Ebeling, P. Levashov, and M. Schlanges  
//Contrib. Plasma Phys. 44, No. 5-6, 388 – 394 (2004)

Полная энергия водородной плазмы: штриховая линия отображает поведение рассчитанной кривой на участках где возникают нефизичные эффекты в МД. Треугольники, кружки и квадраты – классическая МД с различными псевдопотенциалами, ромбы – МДВП, крестики – Path Integral Monte Carlo (PIMC).

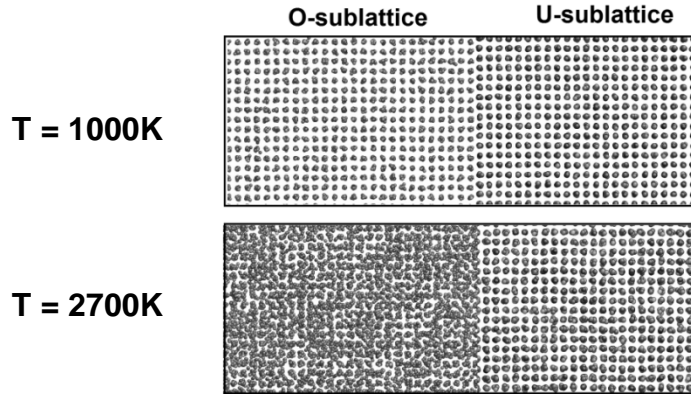
## Публикации

1. Y.S. Lavrinenko, I.V. Morozov, I.A. Valuev. // Contrib. Plasma Phys. 2016. V. 56. P. 448-458.
2. Ya.S. Lavrinenko, I.V. Morozov, I.A. Valuev. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 774. P. 012148.

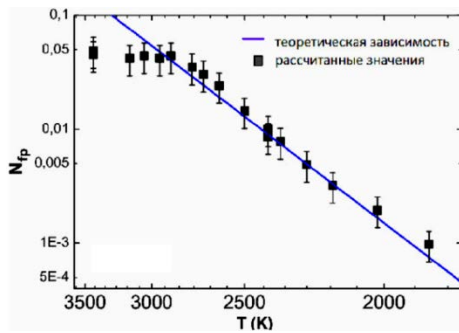
# 1.4. MD-DFT моделирование поведения дефектов в $UO_2$ при термическом и механическом воздействиях

## Точечные дефекты

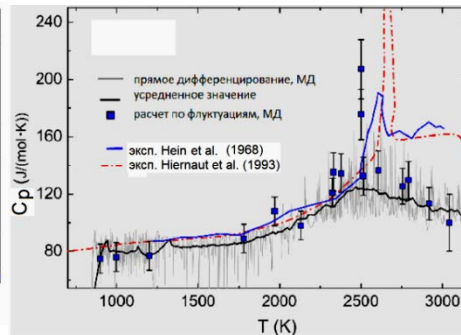
Накопление точечных дефектов в кислородной подрешетке при нагреве (суперионный переход)



Зависимость числа дефектов в кислородной подрешетке от температуры

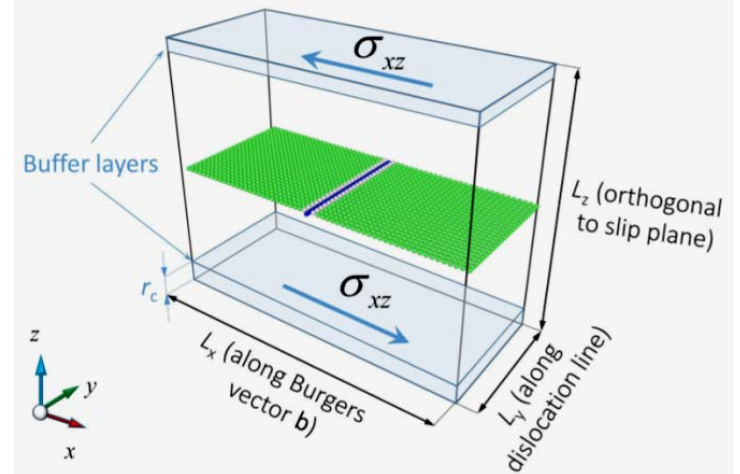


Зависимость теплоемкости от температуры

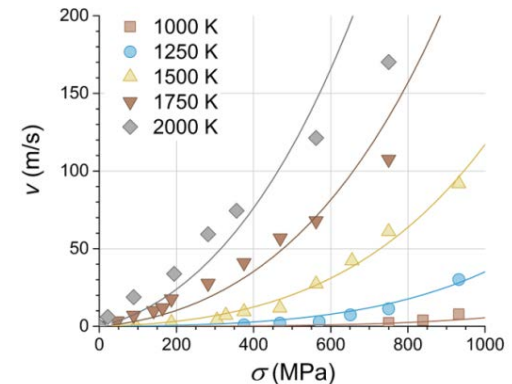


## Дислокации

Движение краевых дислокаций при сдвиговом напряжении (пластичность)

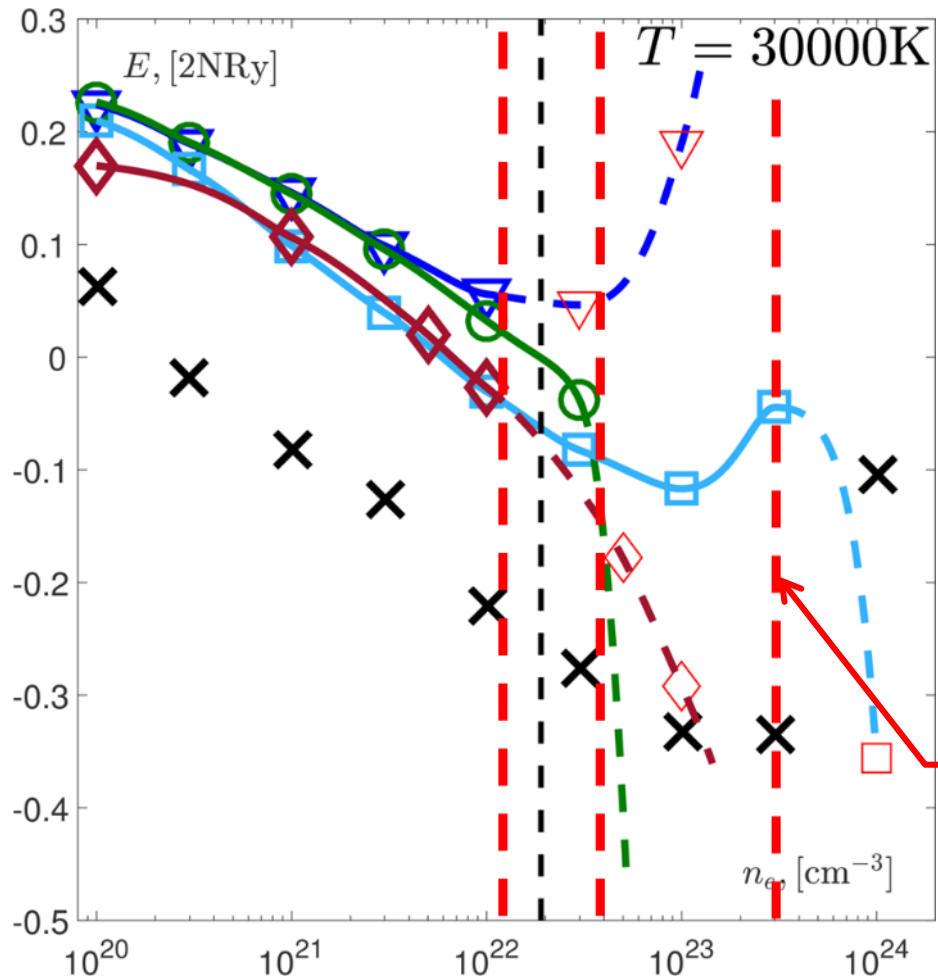


Зависимость скорости дислокации от напряжения



1. Корнева, Стариков // **Физика твердого тела**, т. 58 (2016)
2. Lunev, Kuksin, Starikov // **Int. J. Plast.** V. 89 (2017)

# 1.5. Определение области применимости классической молекулярной динамики и молекулярной динамики с волновыми пакетами для моделирования неидеальной плазмы



- ▽ – Coul-Erf
- – Erf-Erf
- – Kelbg
- ×** – PIMC [1]
- ◇ – WPMC

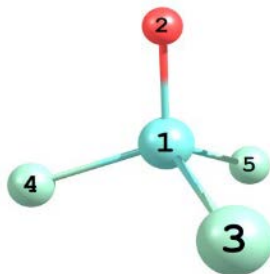
Полная энергия водородной плазмы: штриховая линия отображает поведение рассчитанной кривой на участках где возникают нефизичные эффекты в МД. Треугольники, кружки и квадраты – классическая МД с различными псевдопотенциалами, ромбы – МДВП, крестики – Path Integral Monte Carlo (PIMC).

Границы применимости классической МД с различными псевдопотенциалами

[1]: V. S. Filinov, M. Bonitz, V. E. Fortov, W. Ebeling, P. Levashov, and M. Schlages //Contrib. Plasma Phys. 44, No. 5-6, 388 – 394 (2004)

## 1.6. Расчет термодинамических функций и энтальпий образования молекул $VOX_3$ ( $X=F, Cl, Br, I$ )

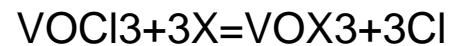
Структура молекул  $VOX_3$  ( $C_{3v}$ ) 1: V;  
2: O; 3-5: X (F, Cl, Br, I)



Расчет энтальпий образования

$$\Delta_f H^\circ(VOCl_3, \text{ г}, 298.15 \text{ К}) = -662.4 \pm 5 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$$

Использован метод DFT с функционалами B3LYP и BPW91 и базисами 6-311+G(d, p) и DGDZVP.  
Получены энтальпии обменных реакций вида:



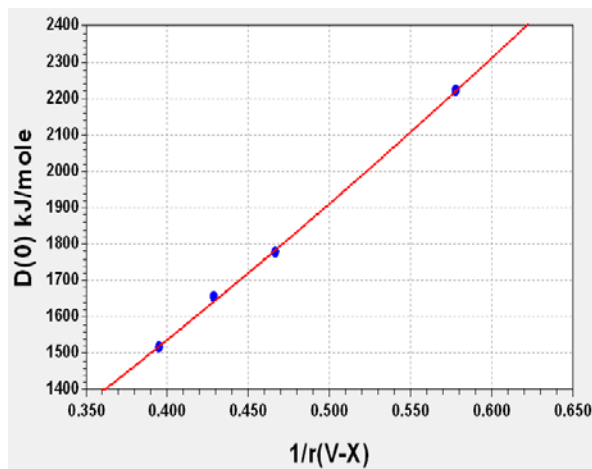
Энтальпии образования получены впервые:

$$\Delta_f H^\circ(VOF_3, \text{ г}, 298.15 \text{ К}) = -1235 \pm 20 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

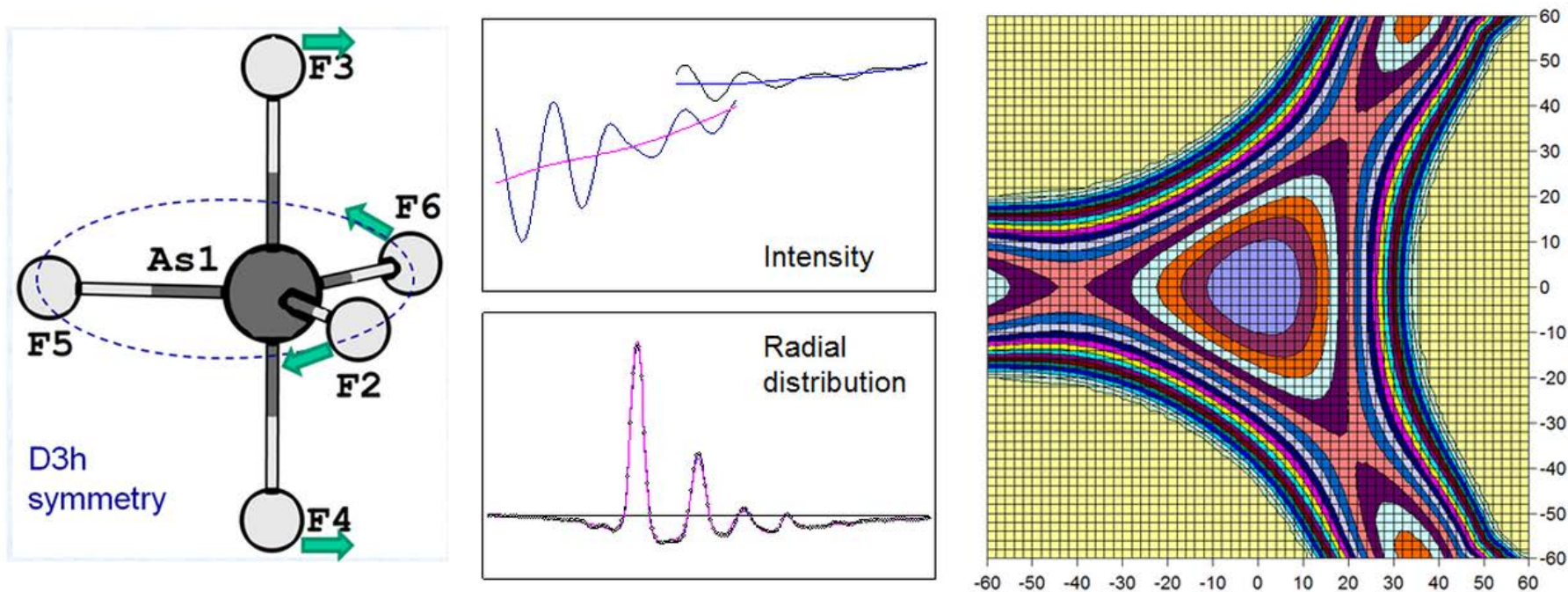
$$\Delta_f H^\circ(VOBr_3, \text{ г}, 298.15 \text{ К}) = -544 \pm 25 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1};$$

$$\Delta_f H^\circ(VOI_3, \text{ г}, 298.15 \text{ К}) = -434 \pm 40 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

График зависимости  $D(0)$  от  $1/r(V-X)$



## 1.7. Равновесные структуры и внутримолекулярные колебания в молекулах со сложными многомерными движениями большой амплитуды



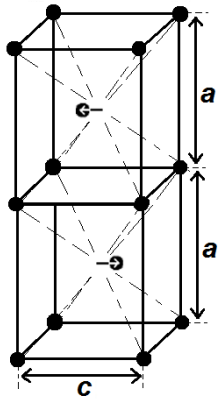
I.V. Kochikov, D.M. Kovtun, Y.I. Tarasov. Electron diffraction analysis for the molecules with degenerate large amplitude motions: Intramolecular dynamics in arsenic pentafluoride. J. Mol. Struct., 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.09.064>.

(В.н.с. лаб. № 4.4.1 ОИВТ РАН, д.ф.-м.н. Ю.И. Тарасов, тел. (495) 484-18-01)

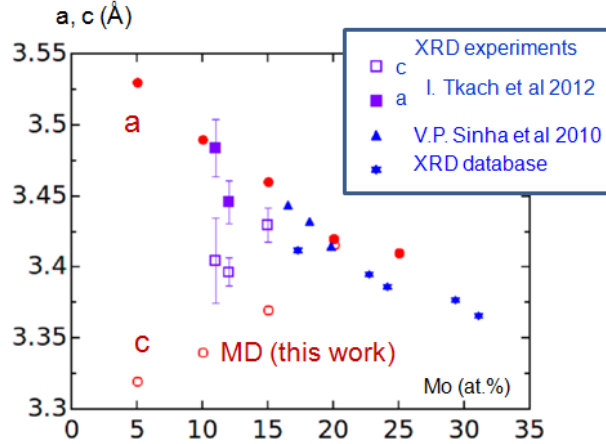


# 1.8. Исследование на основе расчетов из первых принципов механических и термодинамических свойств перспективного ядерного топлива: нитрид урана и сплав U-Mo

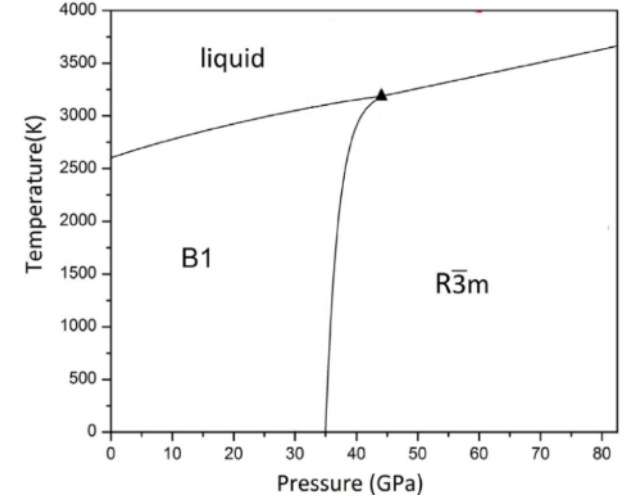
Структура сплава U-Mo



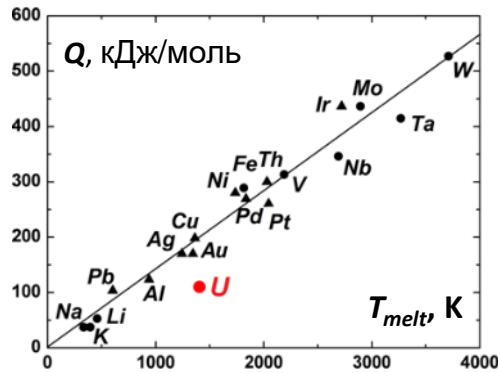
Зависимость параметров решетки от состава в сплаве U-Mo



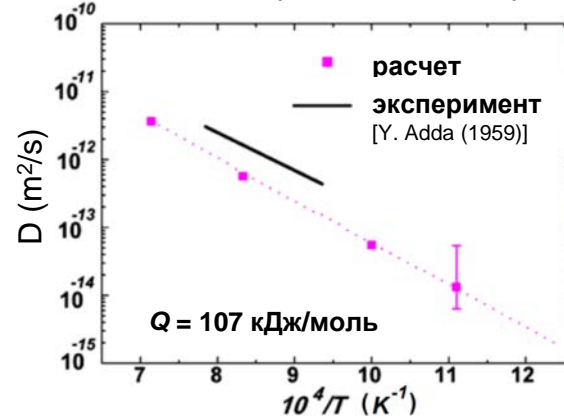
Рассчитанная фазовая диаграмма UN



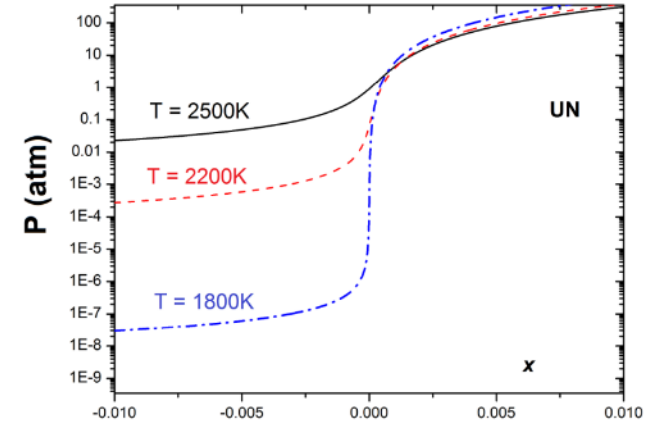
Аномально низкая энергия активации самодиффузии в уране



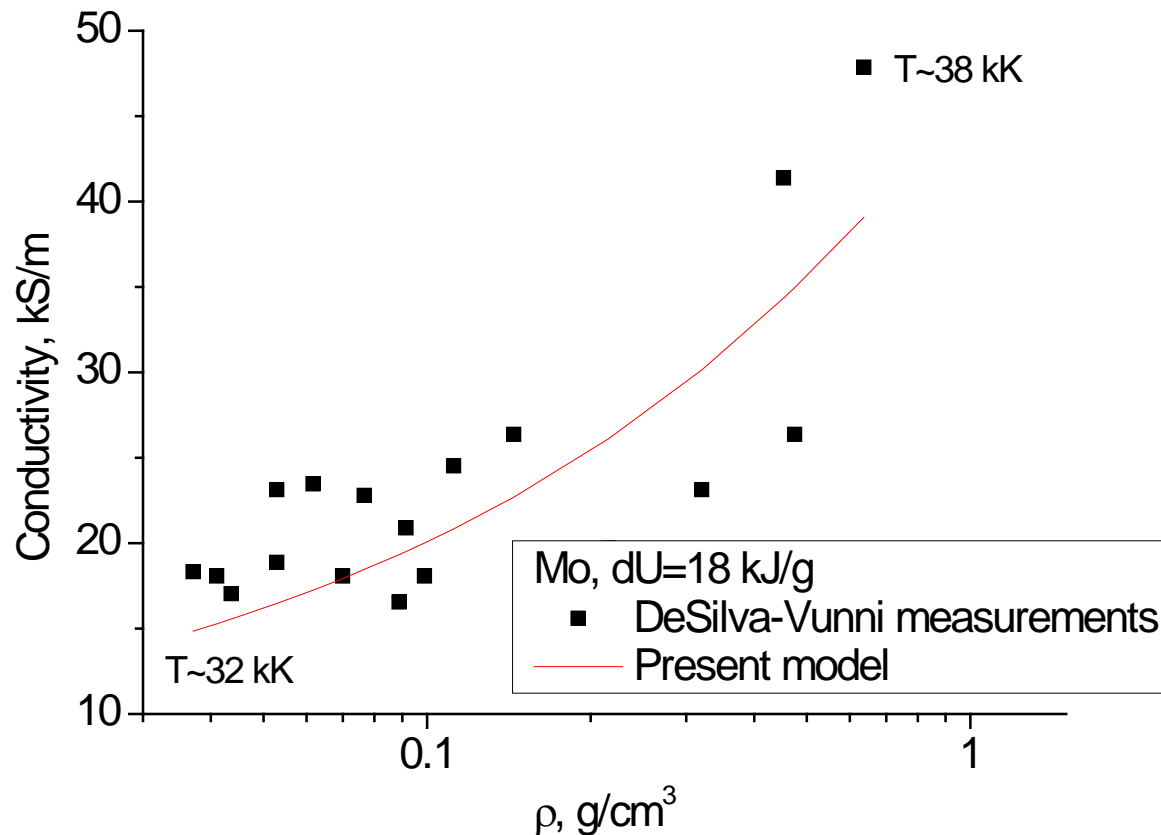
Зависимость коэффициента самодиффузии от температуры



Зависимость парциального давления азота от стехиометрии в UN<sub>1+x</sub>



## 1.9. Уравнение состояния и электропроводность плазмы никеля



Электропроводность плазмы молибдена по данным измерений и по нашей модели на линии постоянной внутренней энергии

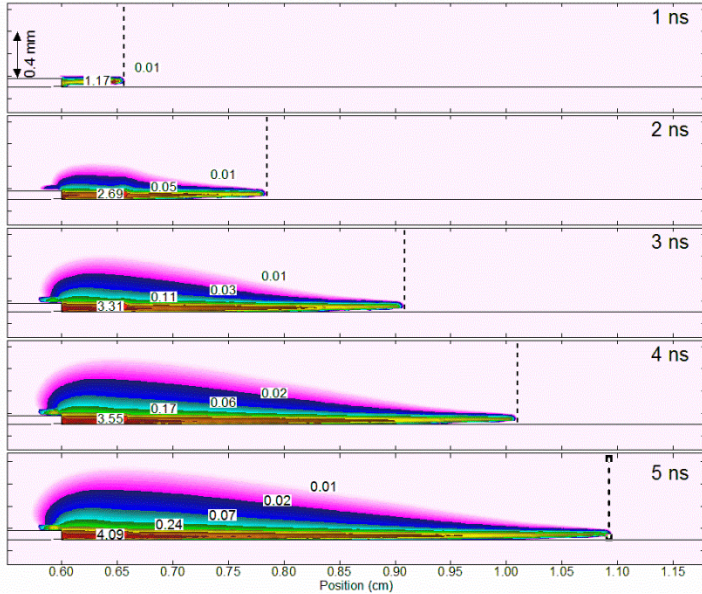
(Лаб. №4.3.1, с.н.с., к.ф.-м.н. Е.М. Апфельбаум, тел. (495)4844433)

## 2. Неравновесная плазма, разряды, стримеры, электрический пробой в жидких и газовых средах



# 2.1. Моделирование поверхностных наносекундных разрядов с использованием метода МС: влияние полярности и вторичной электронной эмиссии

Hybrid Simulation, +12 kV  
Electron Density ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), 3 dec

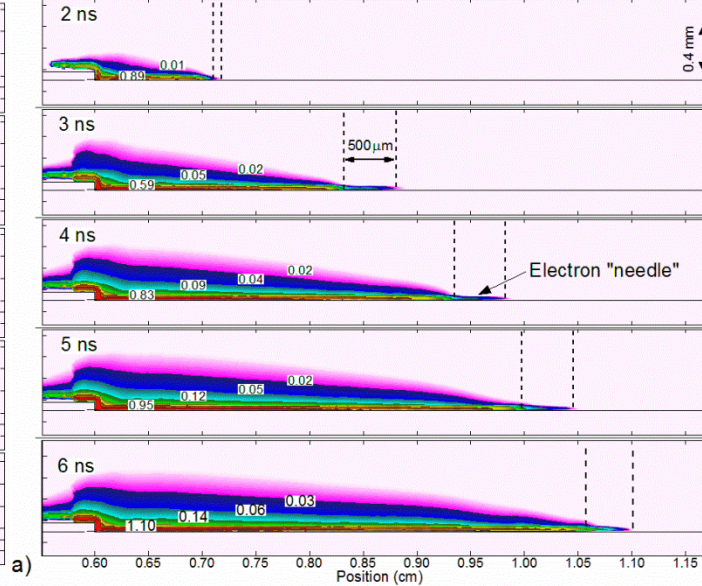


Расчеты положительного стримера с использованием метода Монте Карло

MIN MAX

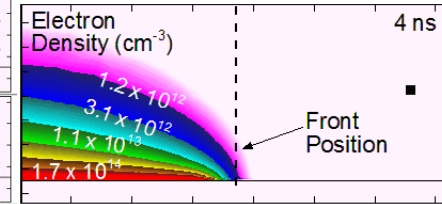
Natalia Yu. Babaeva, Dmitry V. Tereshonok, George V. Naidis, "Fluid and hybrid modelling of nanosecond surface discharges: effect of polarity and secondary electrons emission", *Plasma Sources Sci. Technol.* 25 (2016) 044008.

Hybrid Simulation, -12 kV  
Electron Density ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), 3 dec

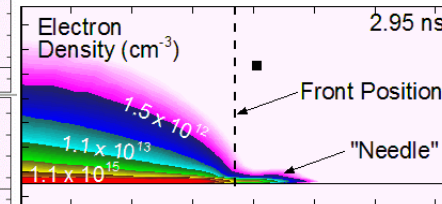


Расчеты отрицательного стримера с использованием метода Монте Карло – появление плазменной “иглы”.

Структура фронта (жидкостная модель)



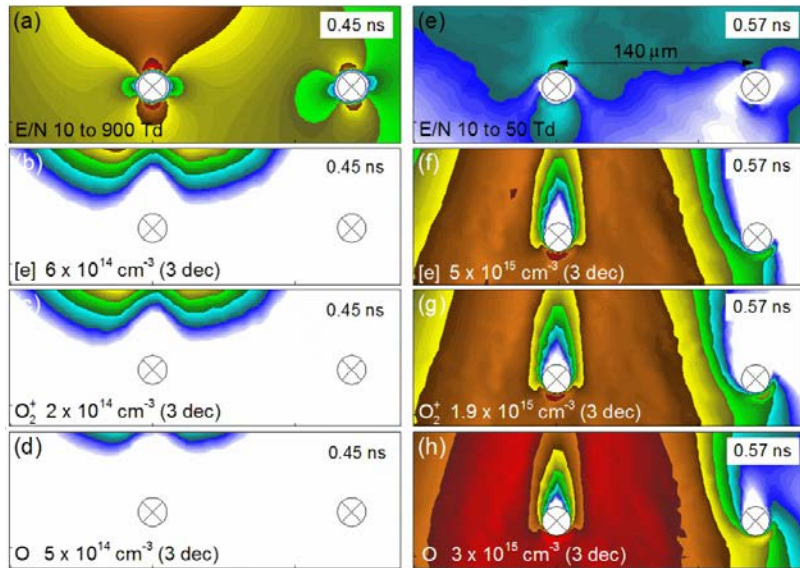
Структура фронта (Монте Карло)



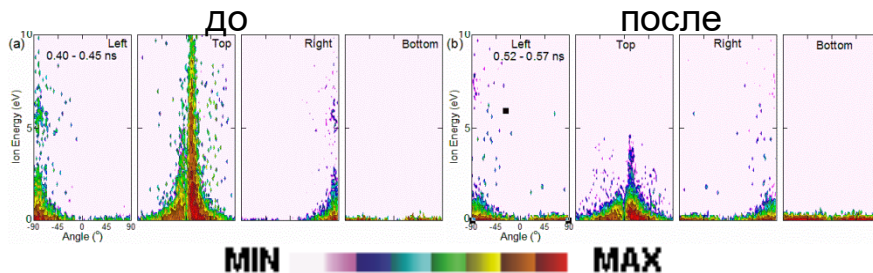
Вторичные электроны перед фронтом отрицательного стримера захватываются в пристеночном слое (плазменная “игла”).

## 2.2. Энергии ионы и потоки радикалов при взаимодействии стримера с частицами в воздухе и на поверхности: расчеты с использованием метода МС

Параметры плазмы до и после взаимодействия стримера с левитирующими частицами

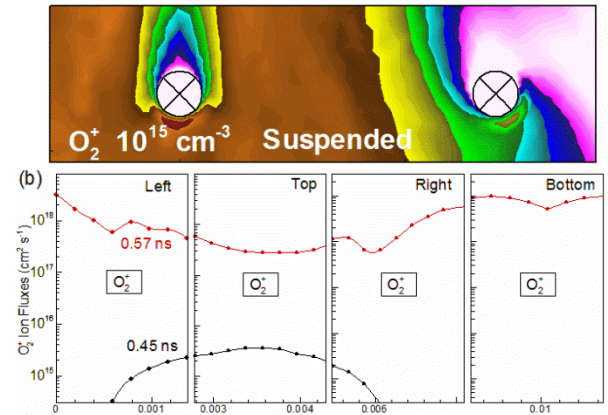


Распределение ионов по энергиям:

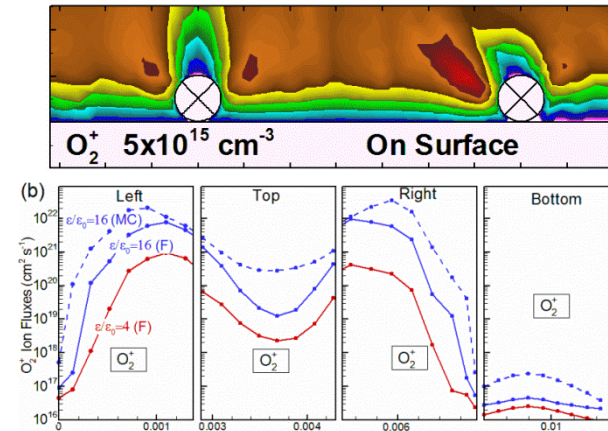


N. Yu. Babaeva, "Hybrid and Fluid Modelling of Ion Activation Energy and Reactive Fluxes to Particulates Suspended in Air and Residing on Surfaces", *Plasma Processes and Polymers* (2016). DOI: [10.1002/ppap.201600165](https://doi.org/10.1002/ppap.201600165)

Концентрации и потоки ионов  $O_2^+$  для левитирующей частицы



Для частицы на поверхности

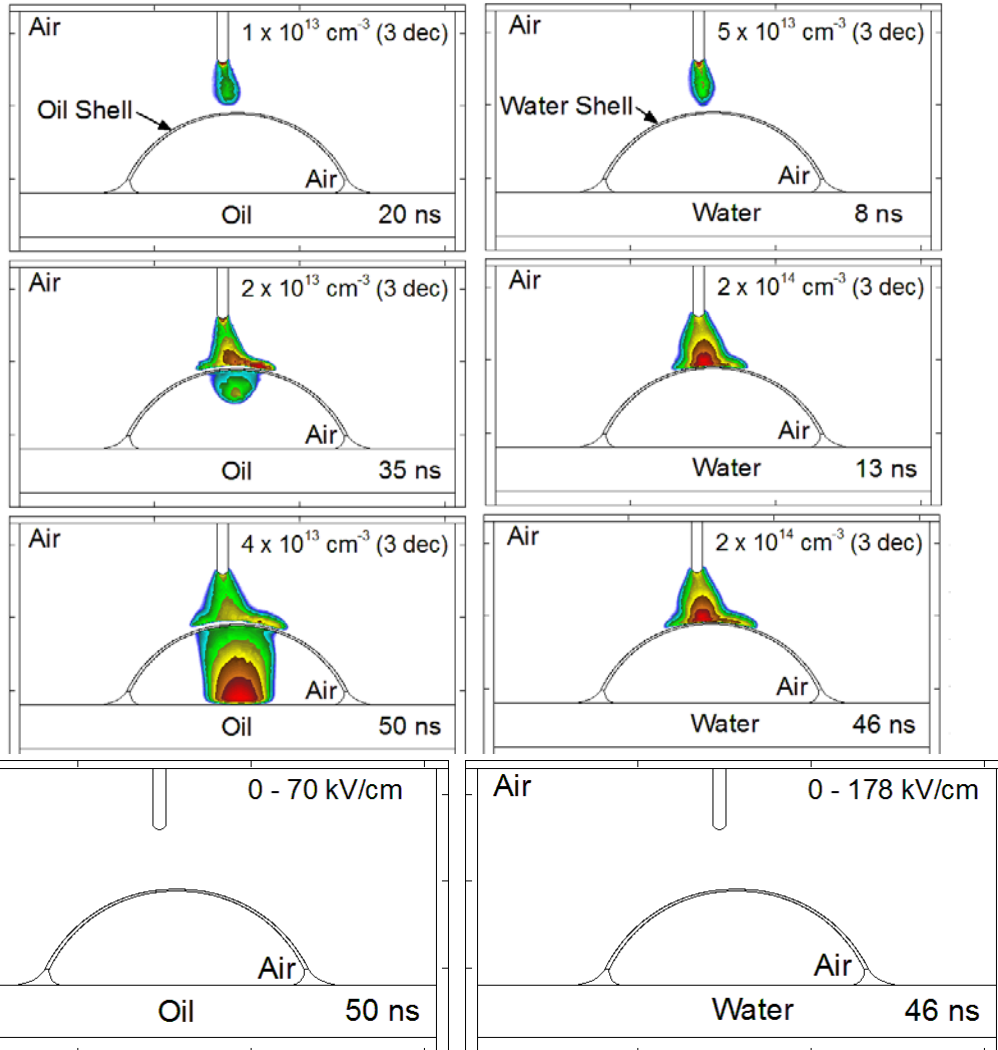




## 2.3. Взаимодействие стримеров с водяными и масляными пузырьками

### Пузырек из масла

### Водяной пузырек



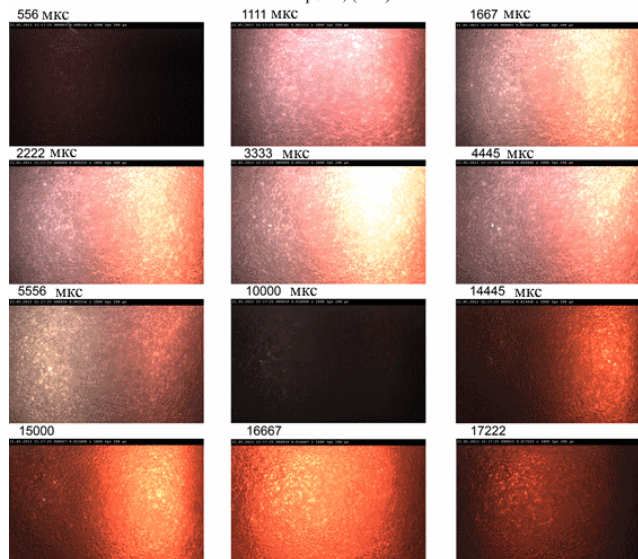
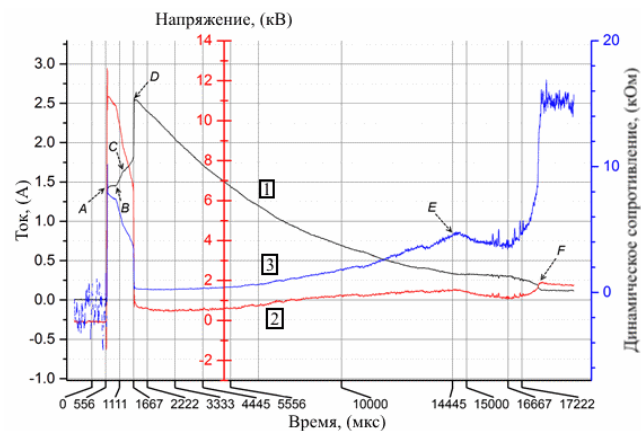
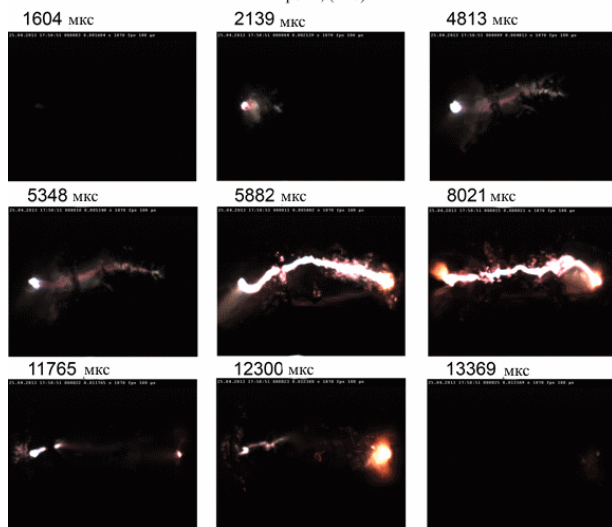
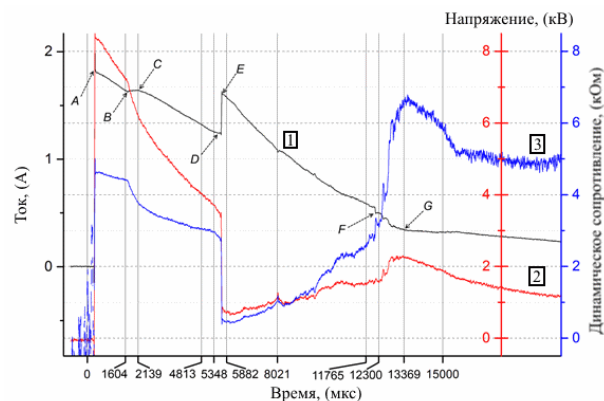
В случае водяного пузырька, стример скользит вдоль его внешней поверхности без проникновения во внутрь.

Для пузырьков из трансформаторного масла, электрическое поле проникает внутрь пузырька.

В этом случае стример может повторно ре-иницироваться внутри пузырька.

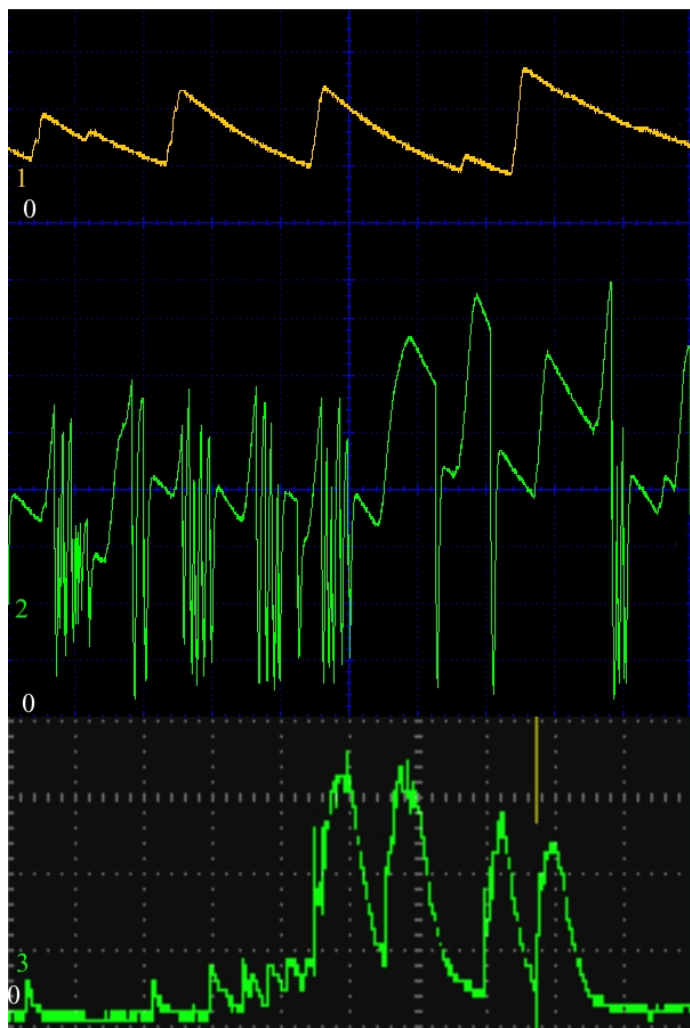
MIN MAX

## 2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ВОДЕ С ПУЗЫРЬКАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЪЕМНОГО ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ



Осциллограмма тока (1), напряжения (2) и сопротивления (3) на разрядном промежутке, синхронизированная с изображениями в воде в жидкости без пузырьков,  $U_0=8.3$  кВ. Осциллограмма тока (1), напряжения (2) и сопротивления (3) на разрядном промежутке, синхронизированная с изображениями в воде с объемным газосодержанием пузырьков 10%,  $U_0 = 11.3$  кВ.

## 2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЯ ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА И ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА

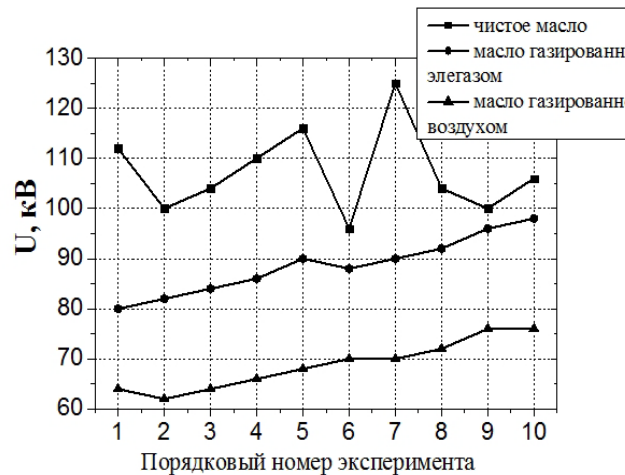


Оциллограмма напряжения и тока:

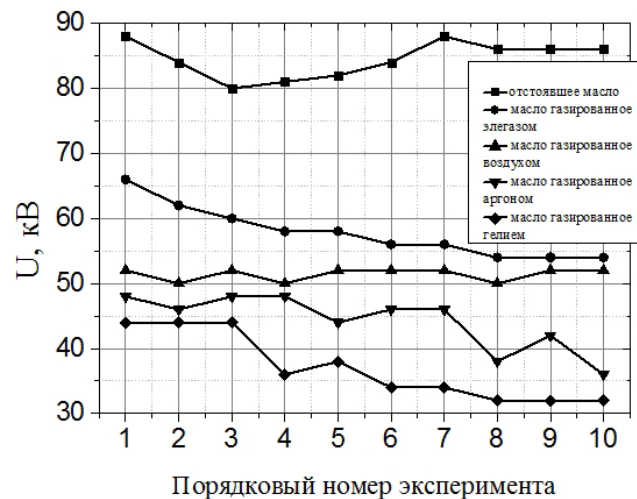
1 – Колебания напряжения на разрядном промежутке при подаче напряжения меньше пробивного  
(цена деления 13.5 кВ/дел, развертка 10 мс);

2 – напряжение разряда (цена деления 13.5 кВ/дел, развертка 10 мс);

3 – ток разряда (цена деления 3мА/дел, развертка 1 мс).



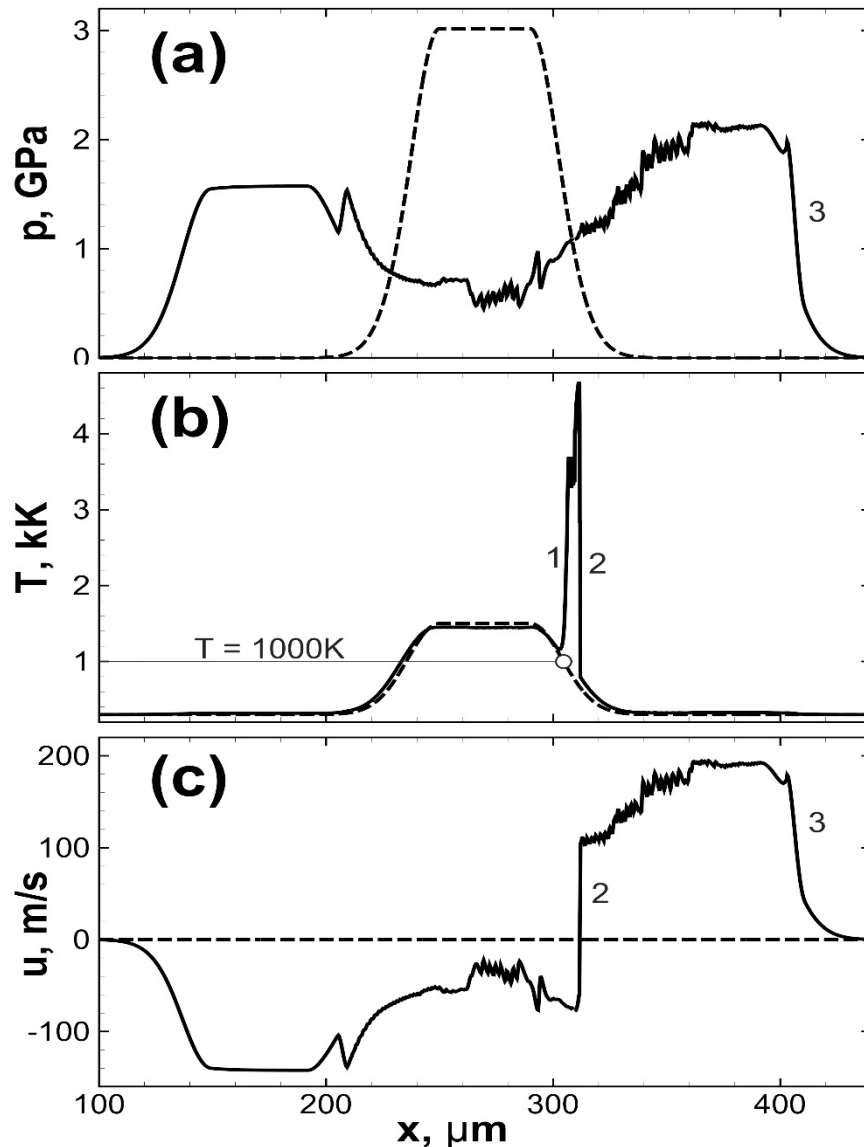
Пробивное напряжение чистого и проточного газированного воздухом и элегазом трансформаторного масла с объемной долей газа до 10%



Пробивное напряжение чистого и газированного одиночными пузырьками элегаза, воздуха, аргона и гелия трансформаторного масла

Смирнов Б.М., Дыренков А.В.

## 2.6. Моделирование пробоя и распространения быстрых волн ионизации в световодах



Поле течений, сформированное в результате поглощения лазерного импульса на границе области первичного пробоя протяжённостью 40 мкм и температурой  $T^*=15000\text{K}$ . Пространственное распределение давления (a), температуры (b) и массовой скорости (c) на момент времени 60нс от момента действия лазерного импульса. Штриховые – значения характеристик на начальный момент времени, сплошные линии – на момент 60нс. Отрицательное давление, возникшее в области поглощения излучения на момент 60нс достигает 4,6 ГПа, на рисунке не показано.



## 2.7. Разработка и создание ВЧ генератора разряда для получения металлических кластеров и пористых пленок

Метод получения металлических кластеров размерами в диапазоне 20 – 30 нм основан на испарении металлического электрода в плазме факельного высокочастотного разряда с дальнейшей конденсацией металлических паров вне области разряда на кремниевой подложке.

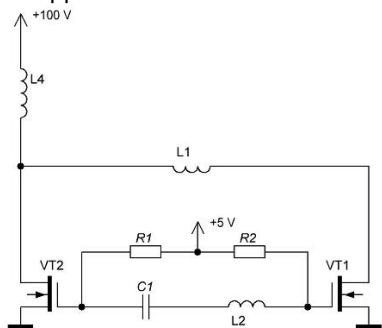
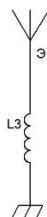


Схема ВЧ генератора для получения кластеров



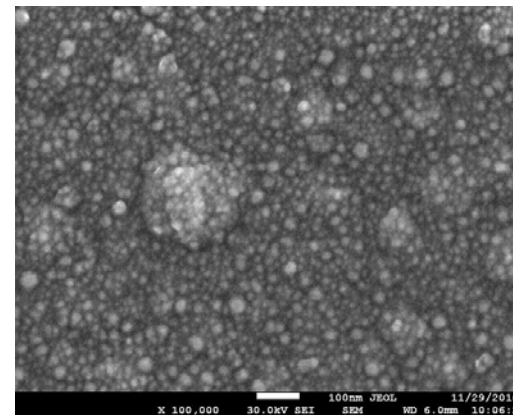
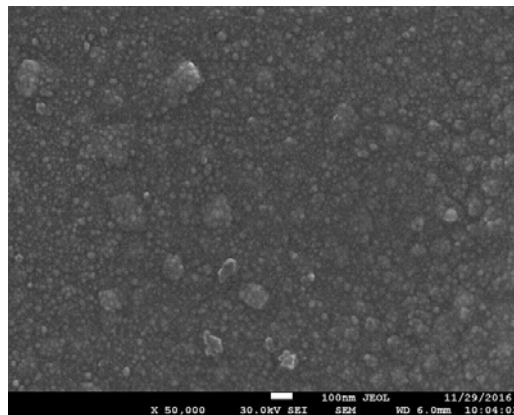
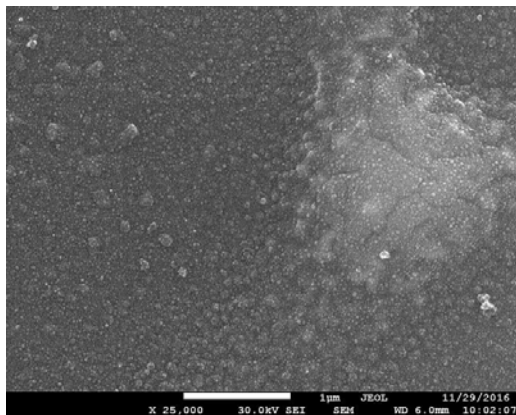
Внешний вид ВЧ генератора



Разрядная колба



ВЧ разряд в атмосфере аргона

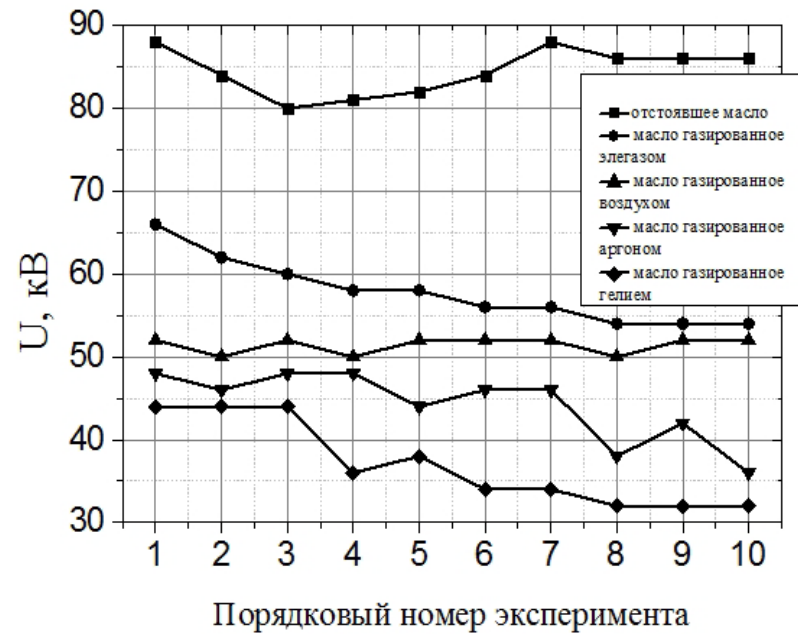
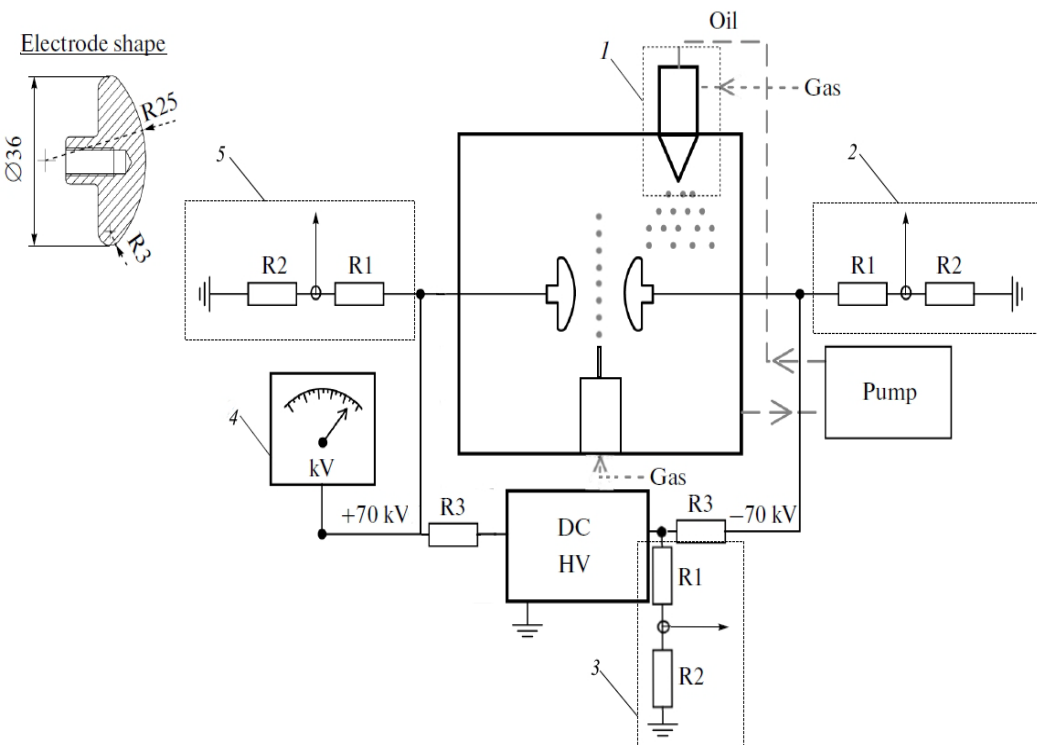


Фотография кластеров в масштабе 1 мкм Фотография кластеров в масштабе 100 нм Фотография кластеров в масштабе

100 нм увеличенная

(Н.с. лаб.4.1.1, А.В. Дыренков)

## 2.8. Исследование пробоя трансформаторного масла с пузырьками различных газов



Порядковый номер эксперимента  
 Пробивное напряжение чистого и газированного одиночными пузырьками элегаза, воздуха, аргона и гелия трансформаторного масла  
 Напряжение пробоя среды

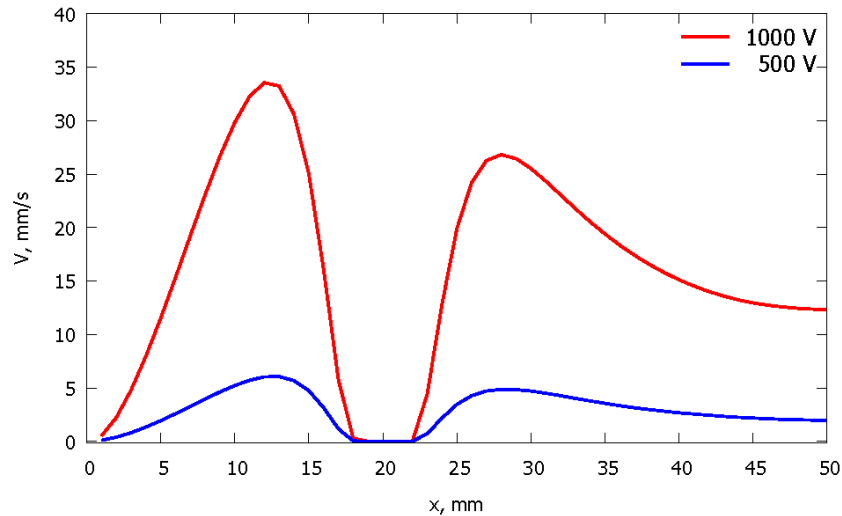
Схема экспериментального стенда:

1 – генератор микропузырьков, 2,3,5 – высоковольтные делители напряжения, 4 – киловольтметр С100

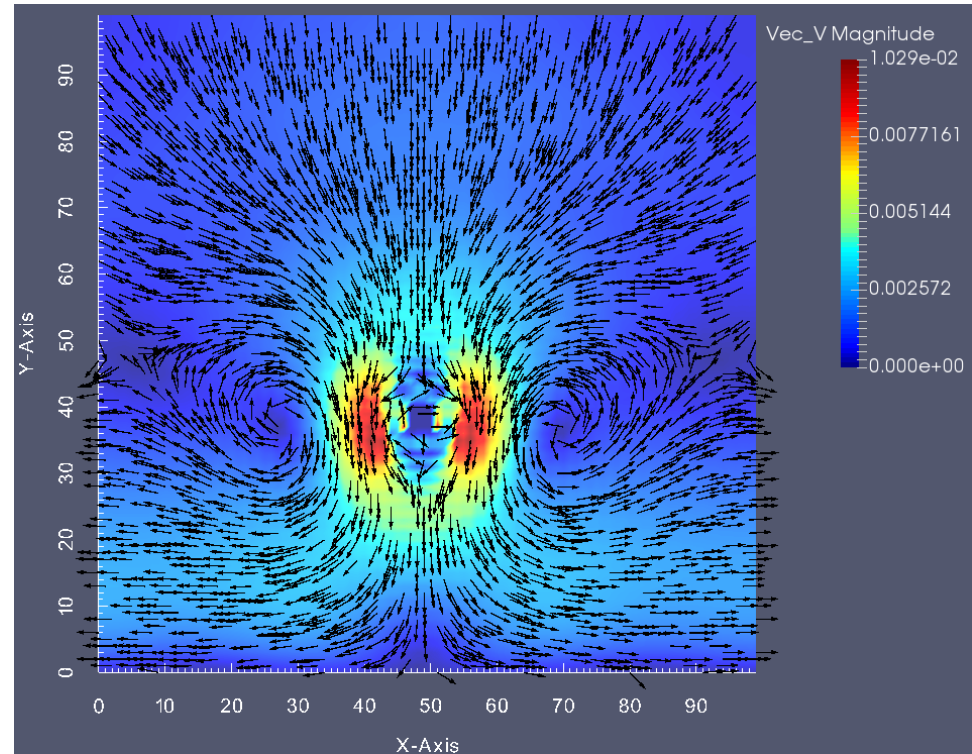
Среда	чистое масло	проточное чистое масло	одиночные пузырьки элегаза	одиночные пузырьки воздуха	газация 3% (элегаз)	газация 3% (воздух)	газация 10% (элегаз)	газация 10% (воздух)
$U_{пр.ср}$ , кВ	107	128	90	77	89	73	88	68



## 2.9. Исследование течений слабопроводящих, вязких, несжимаемых сред, обусловленных предпробойным электрическим полем



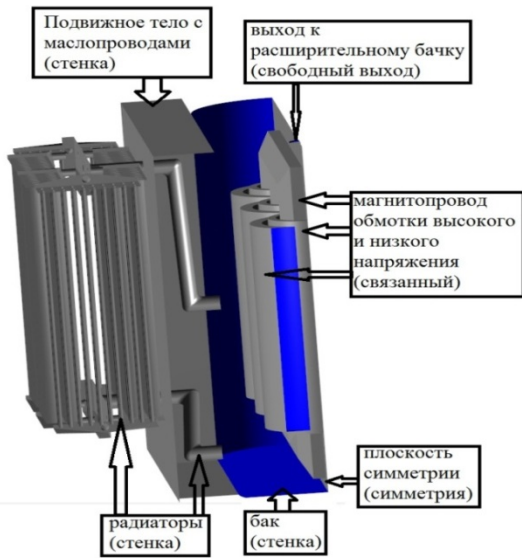
Распределение скорости жидкости между электродами в системе «провод-плоскость». Это течение является осесимметричным электро-гидродинамическим потоком в трансформаторном масле при напряжении 500 В, 1000 В и расстояние между электродами 2 см.



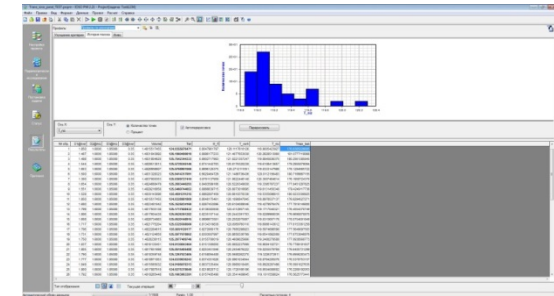
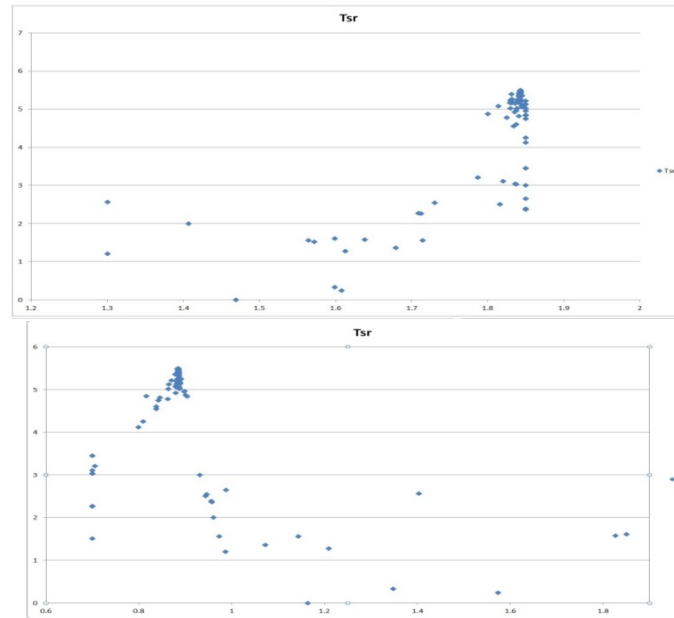
Векторы поля скорости предпробойных течений очищенного трансформаторного масла от двух противоположно заряженных проводов радиусами 0,1 мм. Межэлектродное расстояние 2 см, приложенное напряжение-1кв.

(Лаб. №4.3.1, с.н.с., к.ф.-м.н. М.С. Апфельбаум,  
Лаб. № 4.1.1, зав. лаб., к.ф.-м.н. А.Н. Долуденко)

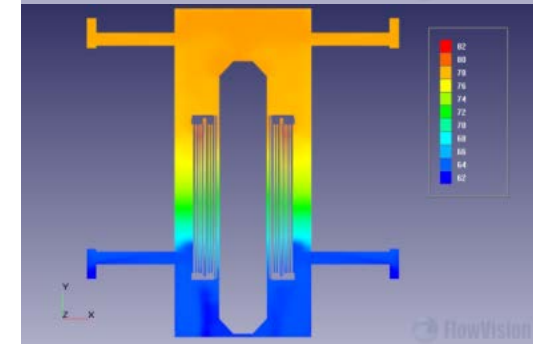
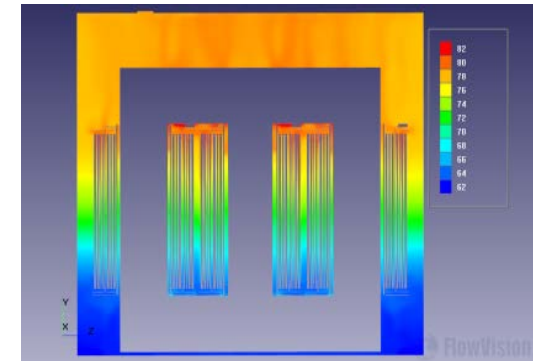
## 2.10. Оптимизация системы охлаждения маслонаполненного трансформатора и оценка эффективности



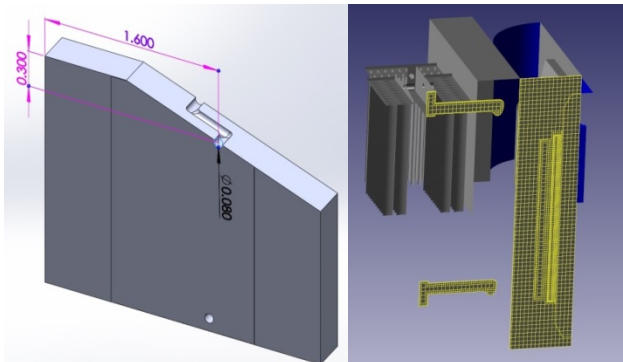
Расстановка граничных условий на расчетной модели маслонаполненного трансформатора



Расчетные точки оптимизации



Распределение температуры масла в баке трансформатора в различных сечениях (температура окружающей среда 20 °С)



Сечение трехмерной модели маслопровода

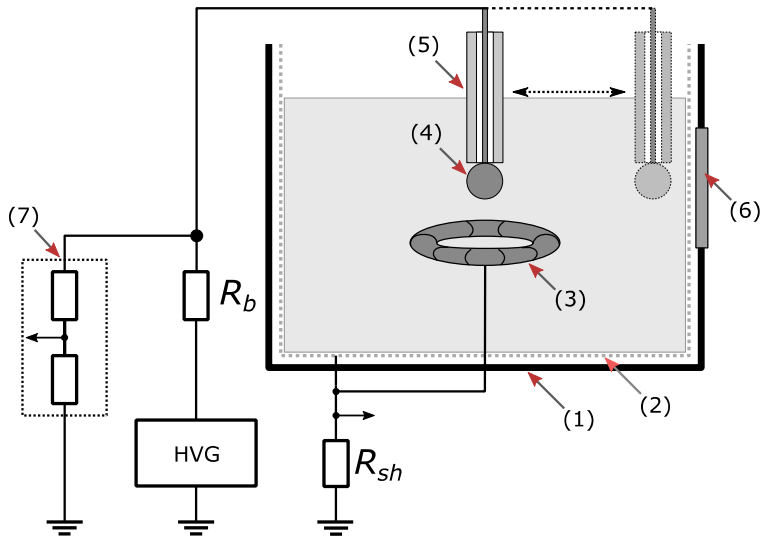
Сечение сеточной модели тестовой геометрии

Уменьшение средней температуры в баке трансформатора при изменении а) положения верхнего маслопровода б) положения нижнего маслопровода

Оптимизационный расчет проведен для положения отверстий, через которые происходит циркуляция масла между баком и радиатором. В процессе оптимизации посчитаны порядка 250 расчетных случаев. В оптимизированном варианте средняя температура в баке трансформатора на 3 градуса ниже используемого сейчас варианта, что позволяет на несколько лет продлить срок эксплуатации оборудования.

Проведенное исследование показывает возможности комплекса по эффективной оптимизации уже существующих промышленных систем без значительных изменений конструкции.

## 2.11. Экспериментальное исследование протекания токов различной амплитуды через грунт для исследования импульсных электрофизических характеристик грунта

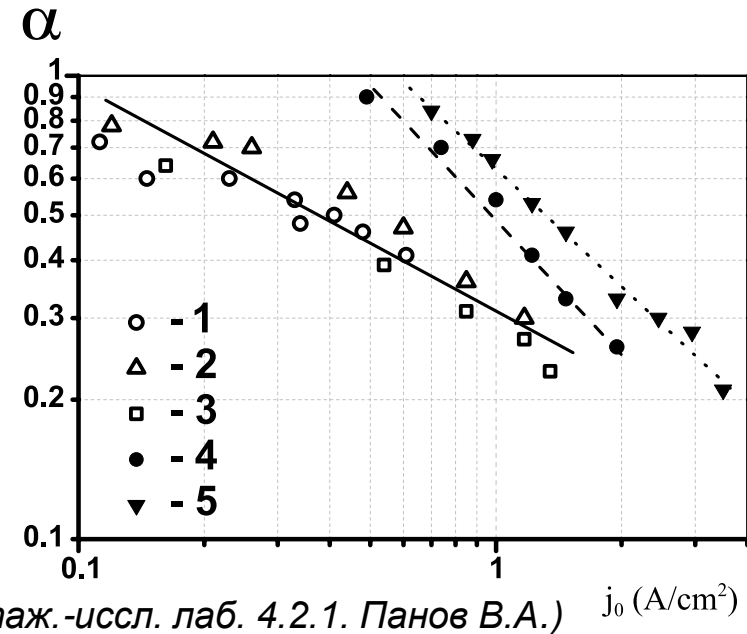


(1) – диэлектрическая ёмкость с песком; (2) – латунная сетка; (3) – кольцевой электрод; (4) – высоковольтный электрод; (5) – стеклянная трубка-изолятор; (6) – смотровое окно; (7) – делитель напряжения; HVG – генератор импульсов напряжения;  $R_{sh}$  – токовый шунт;  $R_b$  – балластное сопротивление.

Зависимость импульсного коэффициента заземления от плотности тока на электроде. 1, 2, 3 – оригинальные результаты для сфер диаметром 4, 2, и 1 см соответственно при влажности 10%; 4, 5 – по данным [14] при влажности 2 и 4% соответственно. Диапазон напряжений 15–40 кВ.



Фотография области свечения разряда.  $U_3=35$  кВ. Влажность песка 25%.



# 3. Горение и детонация

# 3.1. ГОРЕНИЕ ПЕН НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬСИЙ

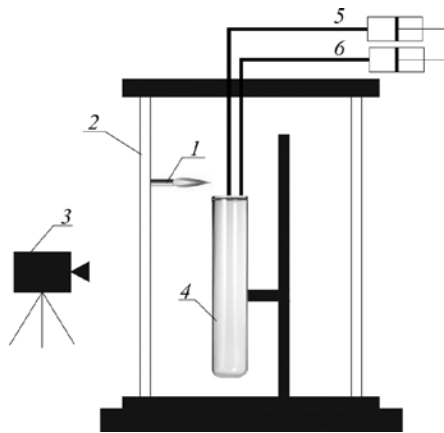
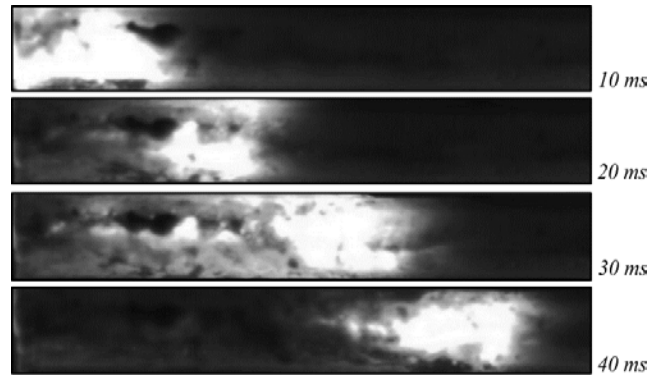
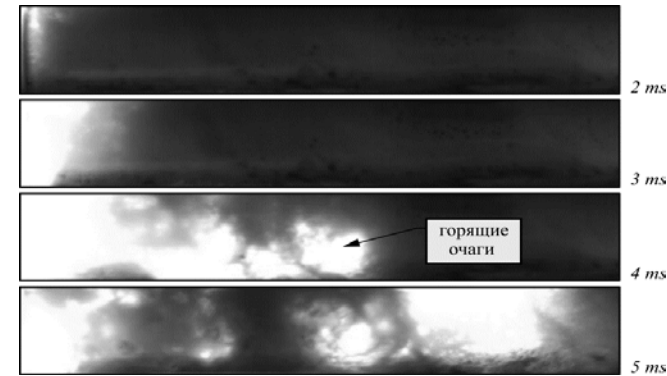


Схема экспериментальной установки: 1 – дежурное пламя; 2 – защитный экран; 3 – скоростная кинокамера; 4 – рабочая полуоткрытая трубка; 5 – система подачи эмульсии; 6 – система подачи перекиси водорода и катализатора.

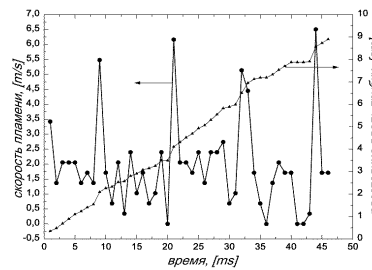


Трубка  $D = 10 \text{ mm}$ ; циклогексан (1 мл)



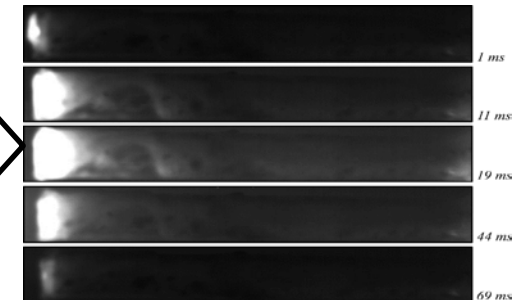
Трубка  $D = 20 \text{ mm}$ ; циклогексан (0,5 мл)

Структура зоны горения пены с циклогексаном: вода (2 мл); сульфанол (0.8 мл, 0.4 моль/л); перекись водорода (0.5 мл); аммиачный раствор сульфата меди (0.4 мл, 1.05 моль/л). Кратность пены 8.5. Общая скорость горения 2.39 м/с.



Зависимость скорости пламени от времени, трубка  $D = 10 \text{ mm}$  : циклогексан 1 мл;

Погасание пламени, трубка  $D = 10 \text{ mm}$  : циклогексан 0.5 мл;

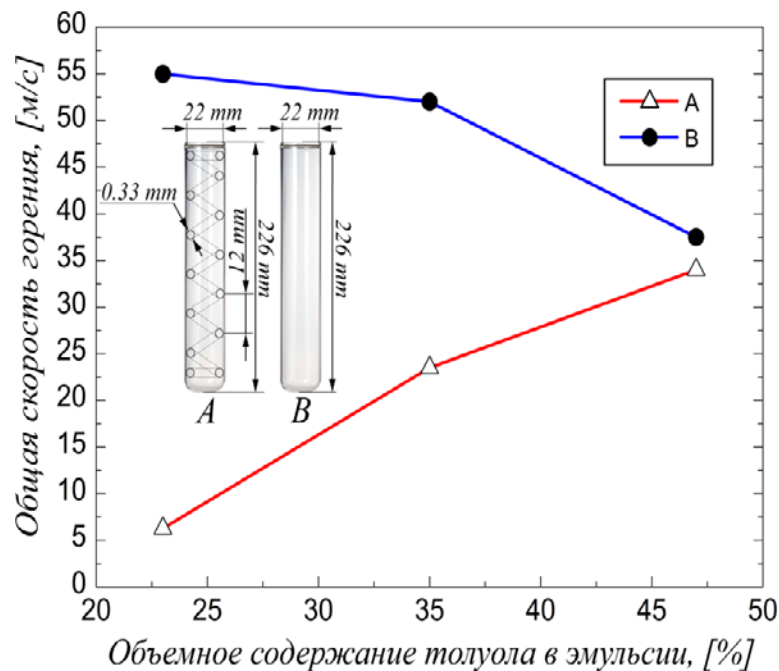


## Выводы:

- При горении пены на основе эмульсий, под действием теплового потока из зоны горения, она разрушается с образованием капель горючего и воды.
- При превышении доли воды некоторого критического значения, пламя в пене не распространяется. При уменьшении диаметра капель воды, которые образуются при разрушении пены и скорости ламинарного горения газовой смеси, критическое содержание воды снижается.
- Ускорение пламени в пене обусловлено выбросами реагирующей смеси, в результате воздействия струй пара, при испарении капель воды.
- При горении пены возможно возникновение колебательного режима изменения скорости пламени. Пульсации скорости пламени возникают благодаря поочередной смене режимов ускорения и торможения пламени. Торможение пламени обусловлено тем, что при увеличении скорости горения пены, за счет уменьшения времени испарения капель горючего в конвективно-диффузионной зоне пламени, снижается концентрация паров горючего во фронте пламени. Это способствует уменьшению температуры во фронте пламени, поэтому вырождается механизм ускорения пламени.
- При уменьшении содержания горючего в исходной эмульсии, колебания скорости пламени в пене ослабевают.
- Колебательный режим изменения скорости распространения пламени наблюдался не только при горении пены в полуоткрытой трубке, но и при горении слоя пены в атмосфере.

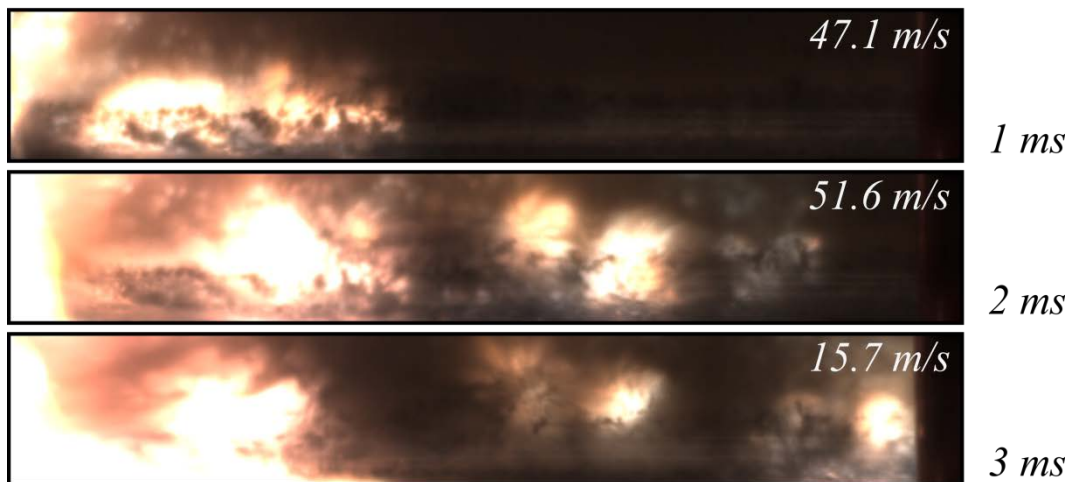


# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ МИКРОПЕН, ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ



Влияние спирали Щелкина в трубке на общую скорость горения пены при изменении содержания толуола в эмульсии

Горение вспененной эмульсии на основе толуола



Combustion and Flame 172 (2016) 162–172



Contents lists available at ScienceDirect

Combustion and Flame

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/combustflame](http://www.elsevier.com/locate/combustflame)



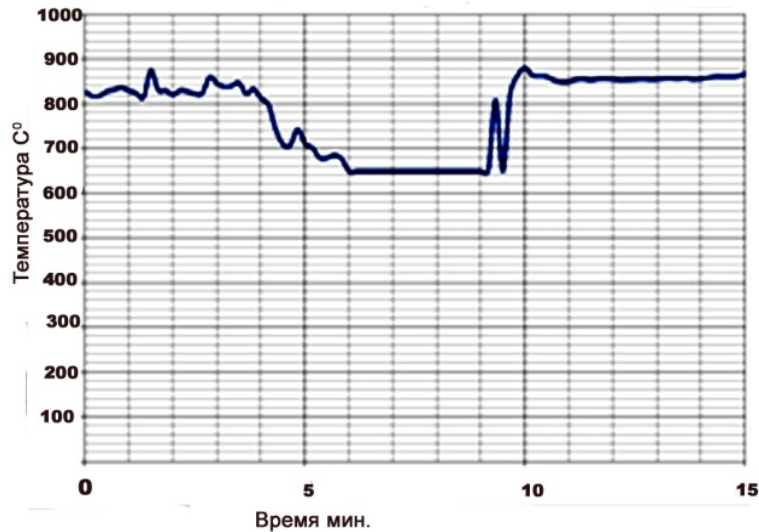
Combustion of emulsion-based foam

Boris Kichatov\*, Alexey Korshunov, Konstantin Son, Eduard Son

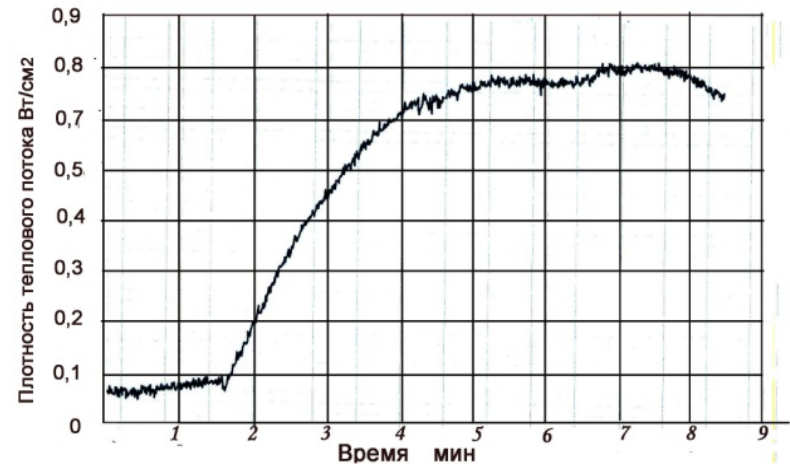
Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow 125412, Russia



## 3.2. Вибрационное горение твердого биотоплива



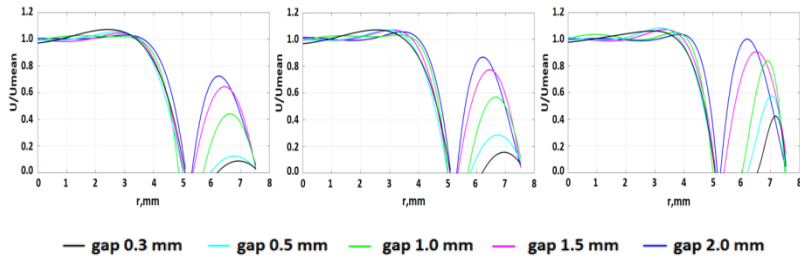
Зависимость температуры пламени от времени при различных режимах горения, "Труба-Рийке". Вибрационное горение наблюдалось в диапазоне времени 4–9 мин



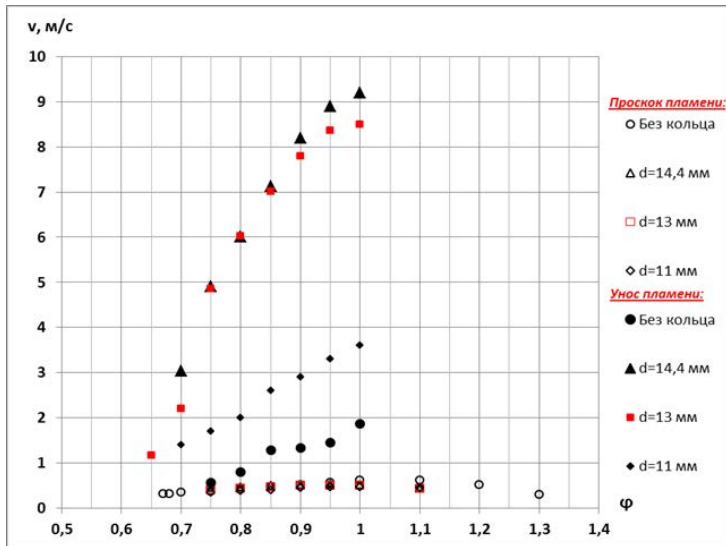
Зависимость плотности теплового потока на стенке камеры сгорания от времени при возникновении и развитии вибрационного горения

# 3.3. Исследование характеристик метано-воздушных пламен

Профили скоростей на выходе из сопла.

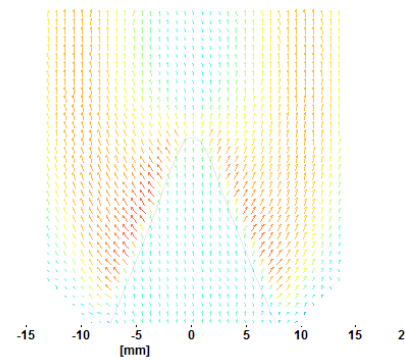


Пределы воспламенения

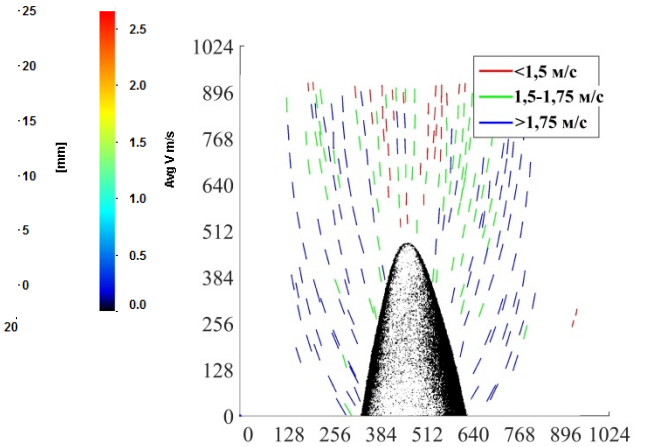


Поля скоростей

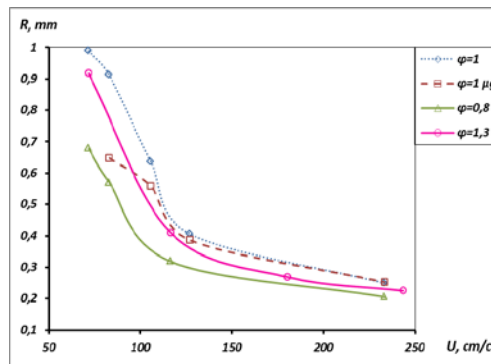
1g Re=750 φ=1



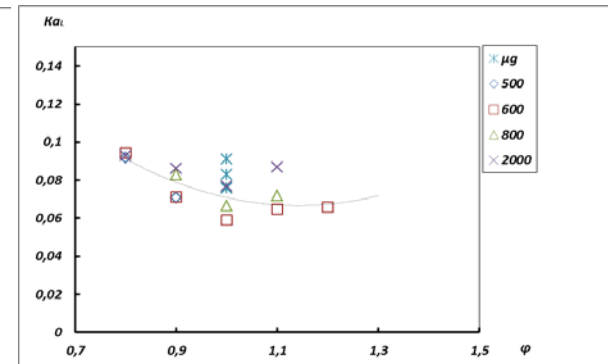
μg Re=1000 φ=1



Радиусы кривизны вершины пламени



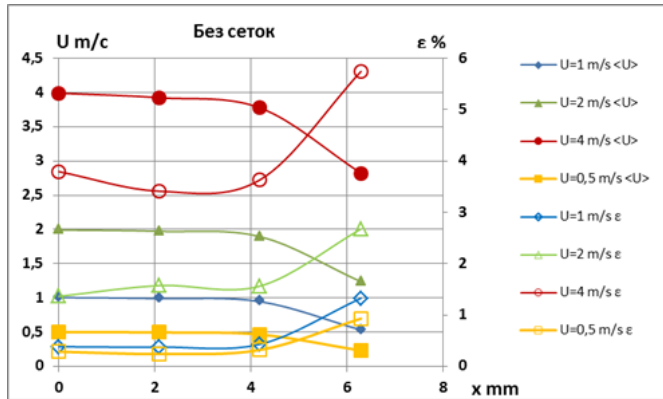
Локальные числа Карловица



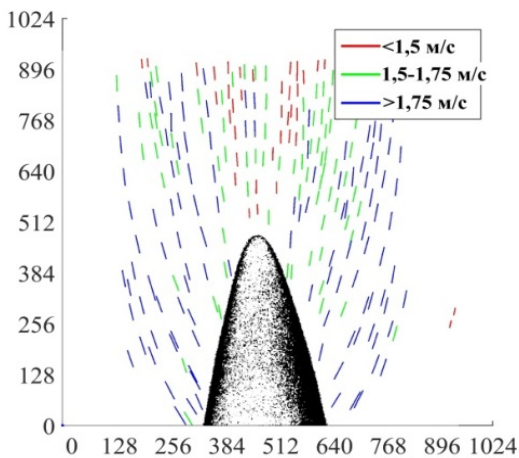


# 3.4. Горение стабилизированных конических метано-воздушных пламен

Профили скорости и турбулентных пульсаций изотермической струи вдоль радиуса у кромки сопла:

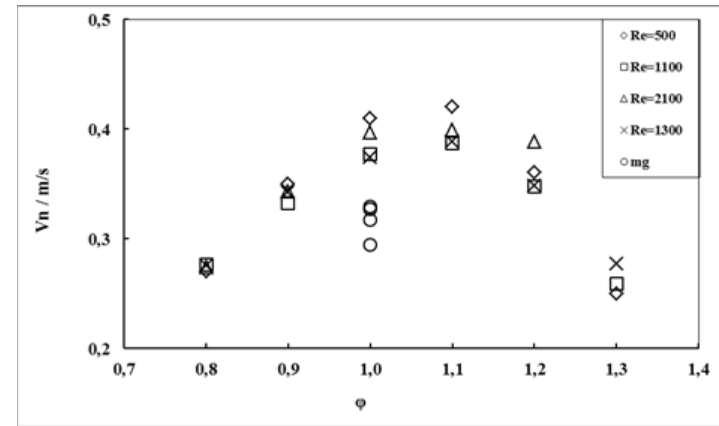


Поле скоростей стехиометрического пламени в условиях микрогравитации:

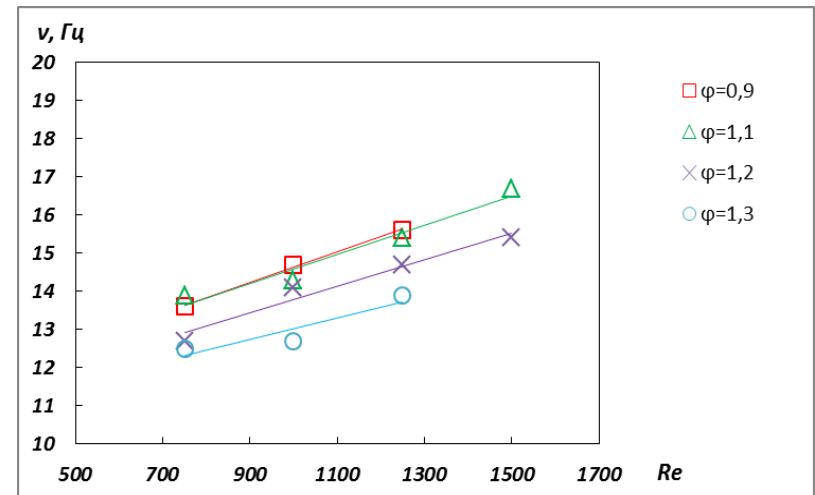


Крикунова А.И.,  
Сон Э.Е.

Скорости ламинарного горения:



Зависимости частоты пульсаций от скорости потока для различных соотношениях горючее/окислитель ( $\phi$ ):



### 3.5. Критерий перехода горения в детонацию газообразных смесей

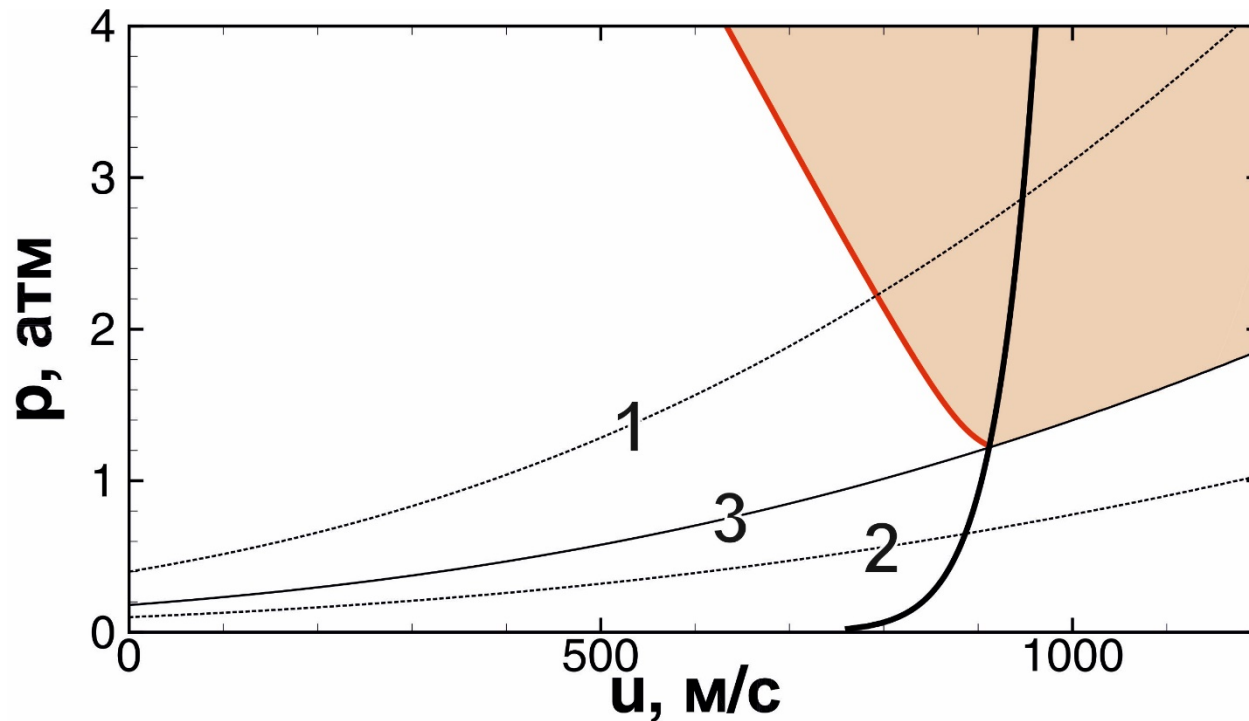
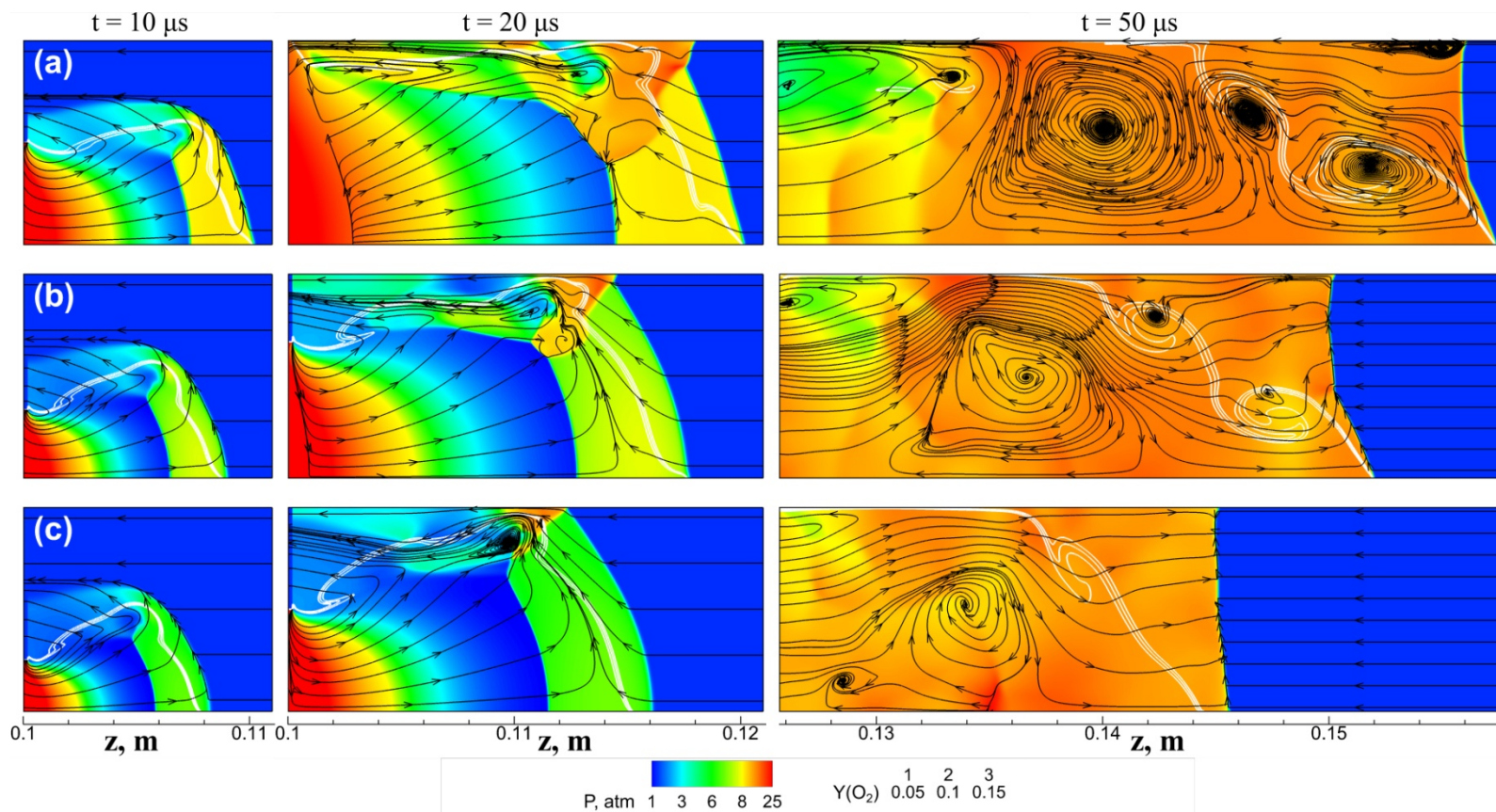


Диаграмма режимов сверхзвукового распространения пламени в стехиометрической водородно-воздушной смеси. Сплошная черная – газодинамический предел ускорения реагирующего потока (скорость звука в продуктах горения), закрашенная область – область формирования детонации на фронте пламени за счет дополнительного ускорения кинетики горения при сжатии. Цифрами обозначены ударные адиабаты, вдоль которых происходит изменение состояния смеси от начальных условий. В случае 1 наблюдается переход к детонации на фронте, в случае 2 – установление квазистационарного режима распространения пламени с околосвуковой скоростью, 3 – предел между реализацией режимов 1 и 2.

(Лаб. №4.3.1, зав. отд., д.ф.-м. н. М.Ф. Иванов, с.н.с., к.ф.-м.н. А.Д. Киверин, м.н.с. И.С. Яковенко, тел. (495)4844433)

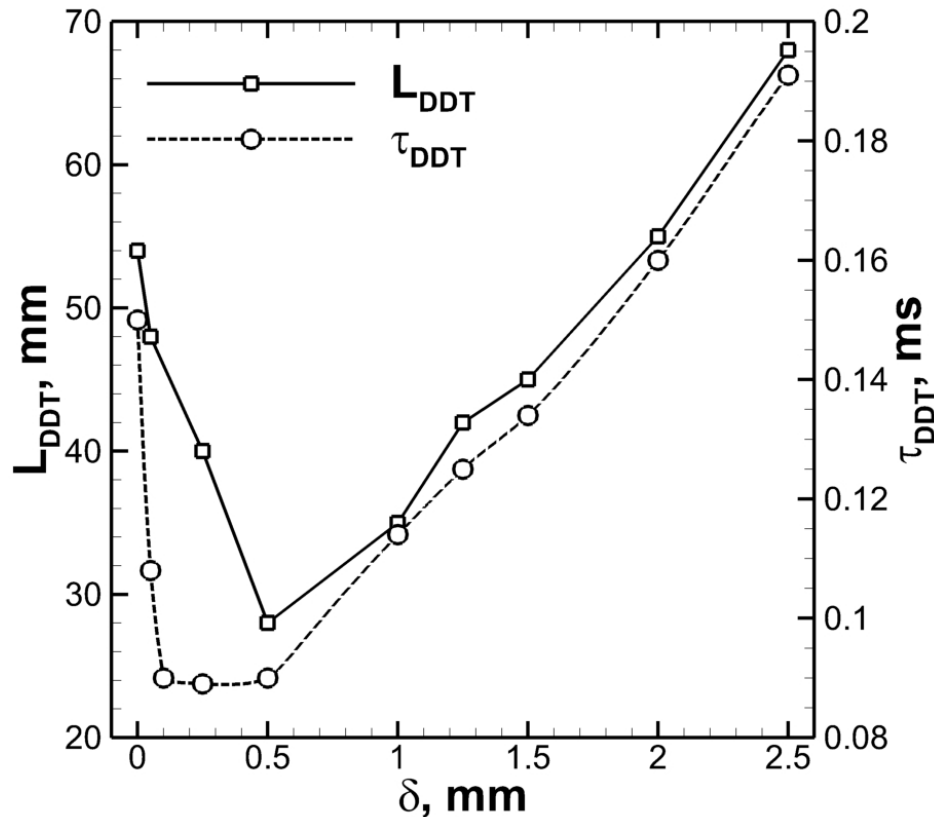
### 3.6. Режимы истечения и воспламенения горючей газообразной компоненты из камеры высокого давления в воздух



Поле распределения давления (цветом) и поле течения (линии тока) в окрестности поверхности струи водорода, формирующейся при разных временах  $t$  раскрытия диафрагмы: (a) –  $t = 20 \mu\text{s}$ , (b) –  $t = 30 \mu\text{s}$ , (c) –  $t = 40 \mu\text{s}$ ; на моменты времени  $t = 10; 20; 50 \mu\text{s}$ . Контактная граница показана с помощью изолиний концентрации кислорода.

(Лаб. №4.3.1, зав. отд., д.ф.-м. н. М.Ф. Иванов, с.н.с., к.ф.-м.н. А.Д. Киверин, м.н.с. А.Е. Смыгалина, тел. (495)4844433)

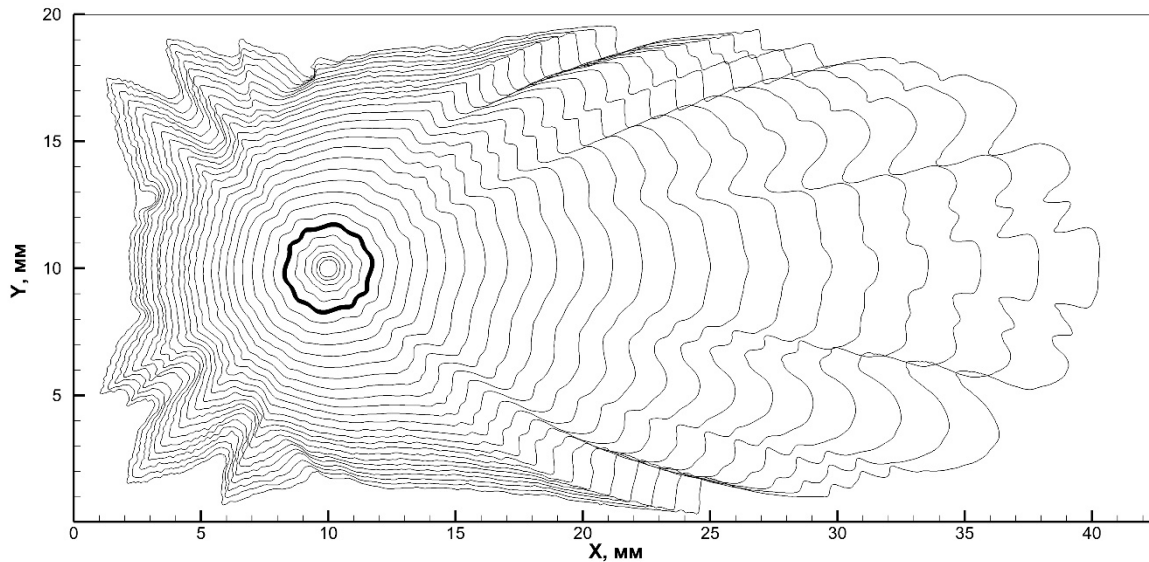
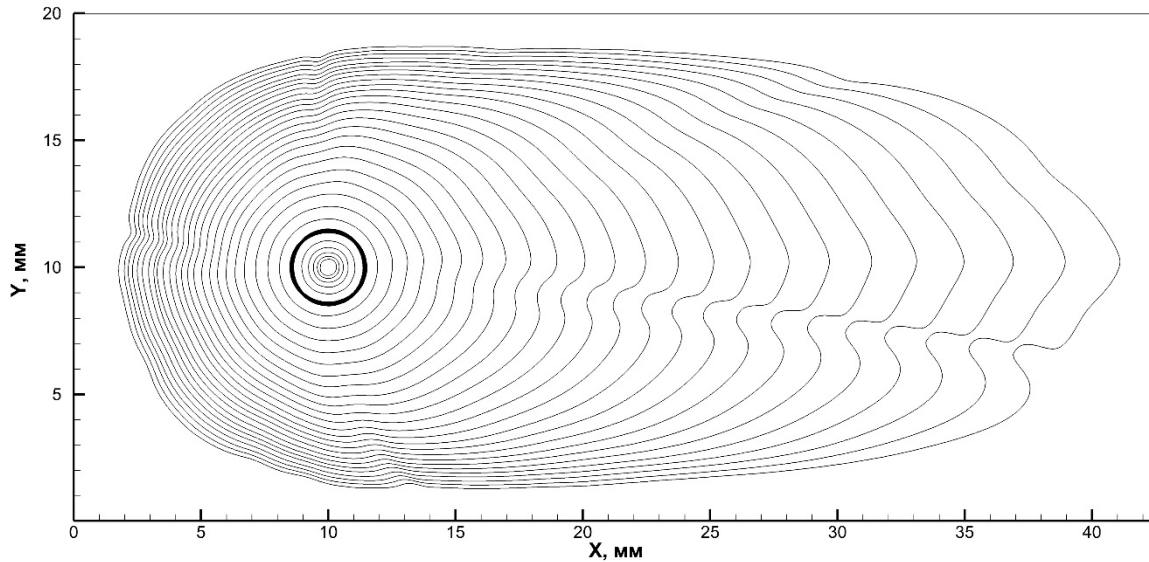
### 3.7. Определение условий формирования взрывных и детонационных волн в газовзвесьях, содержащих энергоактивные центры



Влияние размера неоднородностей химического состава водород-кислородной смеси на параметры процесса формирования детонации. Показаны зависимости времени и характерной длины перехода к детонации. Величина разброса состава смеси  $\sigma=0.22$ .

(Лаб. №4.3.1, зав. отд., д.ф.-м. н. М.Ф. Иванов, с.н.с., к.ф.-м.н. А.Д. Киверин, аспирант Н.А. Метелкин, тел. (495)4844433)

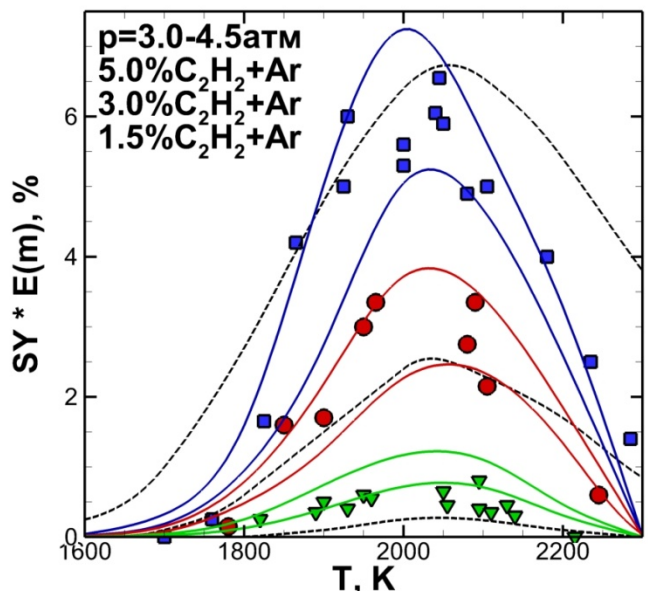
### 3.8. Исследование термоакустической неустойчивости пламени в химически активных газообразных смесях и газозвезях



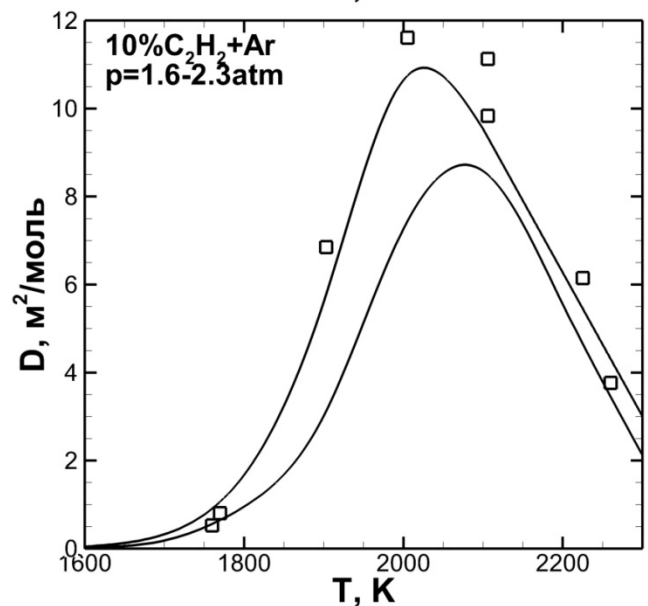
Эволюция структуры фронта пламени, распространяющегося внутри закрытого объема от точечного источника воспламенения. Линиями показана поверхность фронта пламени на разные моменты времени через каждые 5 мкс. Жирная линия соответствует моменту времени прихода первого отражения от стенки на фронт пламени. Сверху – расчет по традиционной эйлерово-лагранжевой методике, снизу – по бездиссипативной методике.



### 3.9. Разработка новых подходов к моделированию и оценке энергоэффективности процесса безкислородного взрыва ацетилена



Сверху – Относительный массовый выход углеродных частиц в фиксированный момент времени (1.0мс) при различных значениях температуры за отраженной ударной волной в условиях эксперимента в ударной трубе. Исследуемой смеси – 1.5% (зеленые значки и линии), 3.0% (красные) и 5.0% (синие)  $C_2H_2$  в аргоне, диапазон давлений за отраженной ударной волной – от 3.0 до 4.5 атм. Значки – результаты экспериментов ИХФ РАН. Пунктирные линии – расчеты по полной модели (ИХФ РАН). Линии – расчеты по построенной модели для давлений 3.0 атм (нижние кривые) и 4.5 атм (верхние).



Снизу - Оптическая плотность среды в фиксированный момент времени (0.7мс) при различных значениях температуры за отраженной ударной волной в условиях эксперимента в ударной трубе. Исследуемая смесь – 10%  $C_2H_2$  в аргоне, диапазон давлений за отраженной ударной волной – от 1.6 до 2.3 атм. Значки – результаты экспериментов ОИВТ РАН. Линии – расчеты по построенной модели для давлений 1.6 атм (нижняя кривая) и 2.3 атм (верхняя).

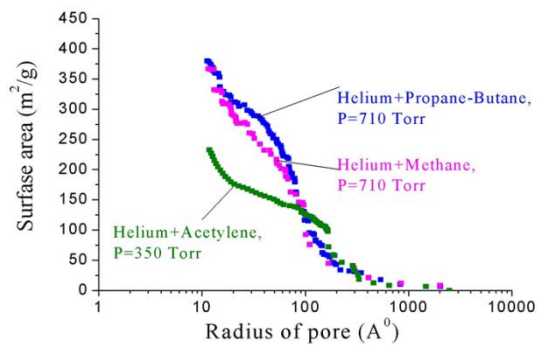
(Лаб. №4.3.1,  
с.н.с., к.ф.-м.н. А.Д. Киверин, м.н.с. И.С. Яковенко,  
тел. (495)4844433)

# 4. Плазменные технологии, синтез новых материалов

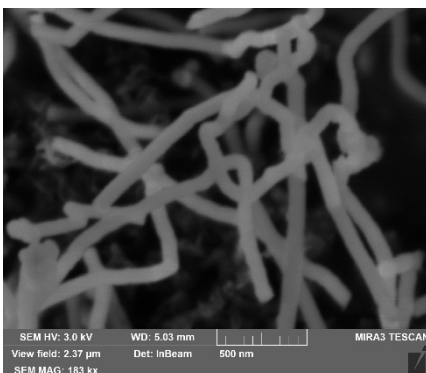
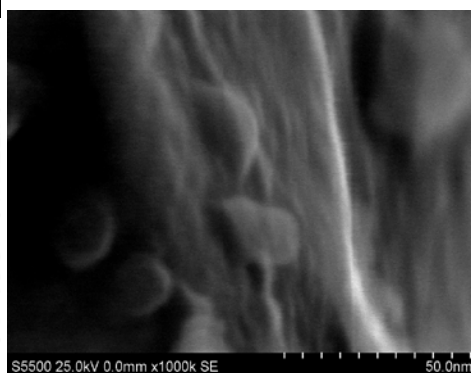
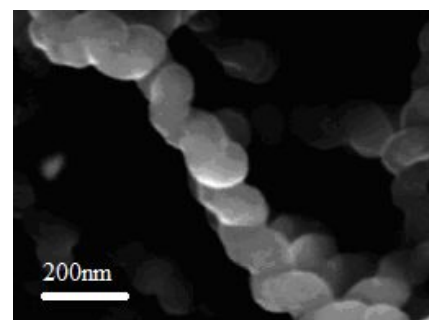
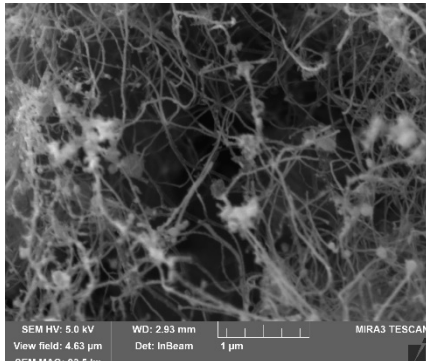
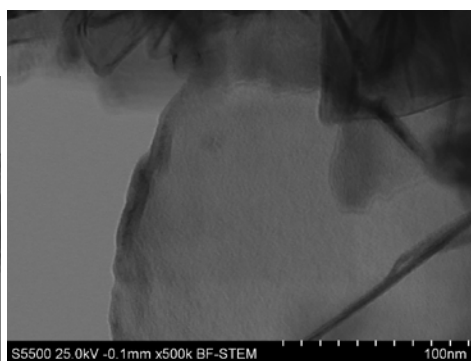
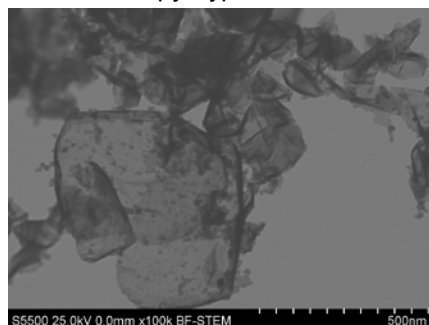
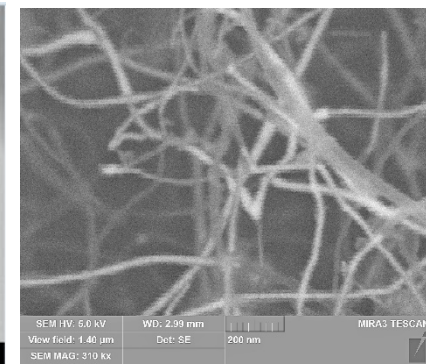
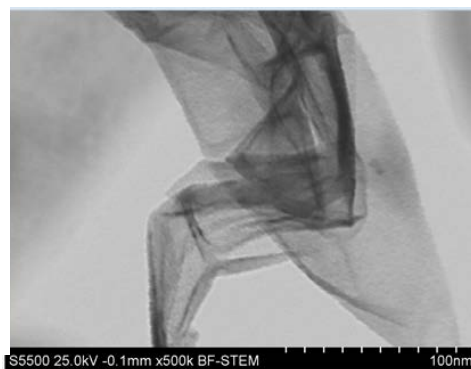
# 4.1. Синтез углеродных наноструктур при разложении углеводородов (пропан-бутан, метан, ацетилен) в плазме гелия и в реакторе на основе плазмотрона постоянного тока



Плазмоструйный реактор



Поверхностные свойства углеродных наноструктур

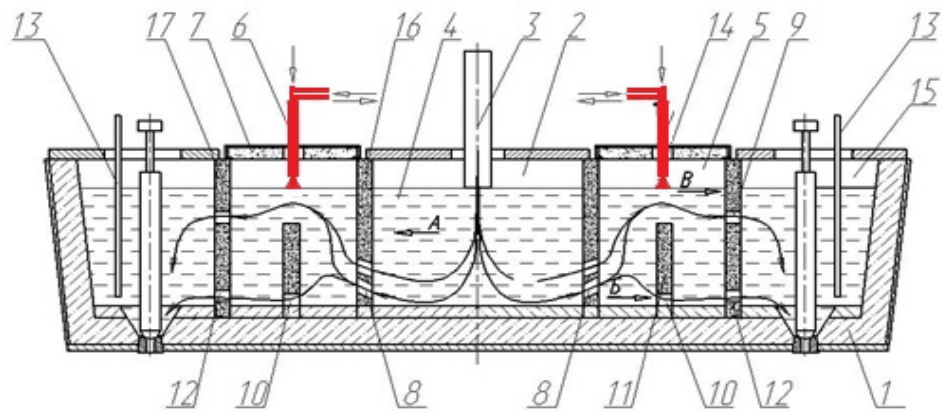
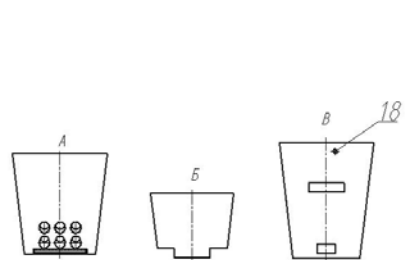


Зависимость напряжения и тока разряда плазмотрона от времени при введении газообразного источника углерода

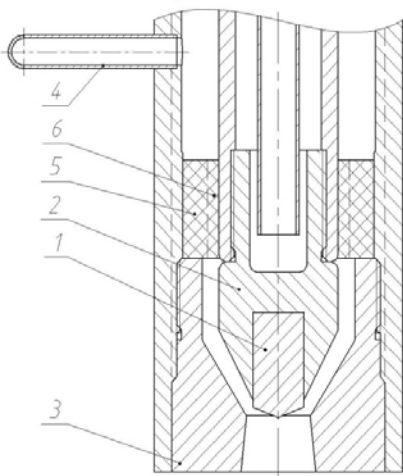
(Зав. Лаб № 2.13.1 д.ф.-м.н. Амиров Р.Х., Зам.зав. отд. № 4.2., к.т.н. Шавелкина М.Б., тел. (495)4859777)



## 4.2. Разработка генератора низкотемпературной плазмы мощностью 2 МВт и опытно-промышленной установки для плазменного подогрева стали

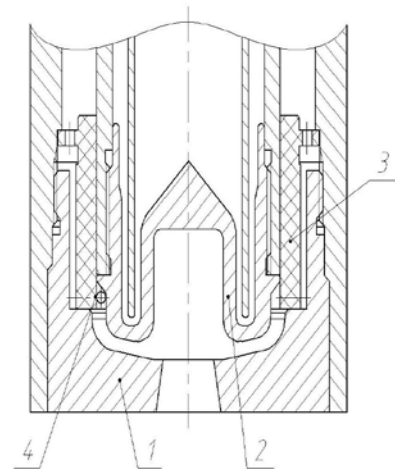


- 1 – промковш;
- 2 – приёмный отсек;
- 3 – защитная труба;
- 4 – расплав;
- 5 – камера подогрева;
- 6 – плазмотрон;
- 7 – крышка камеры подогрева;
- 8 – скиммерная перегородка;
- 9 – верхнее отверстие в доп. перегородке;
- 10 – отверстие в отбойнике;
- 11 – отбойник;
- 12 – нижнее отверстие в доп. перегородке;
- 13 – термопара;
- 14 – отверстие в крышке камеры подогрева;
- 15 – разливочный отсек;
- 16 – крышка промковша;
- 17 – дополнительная перегородка;
- 18 – отверстие для выхода излишка аргона



- 1 – вольфрамовый наконечник;
- 2 – водоохлаждаемая медная обойма;
- 3 – сопло;
- 4 – подача газа;
- 5 – изолятор;
- 6 – продольные газовые каналы.

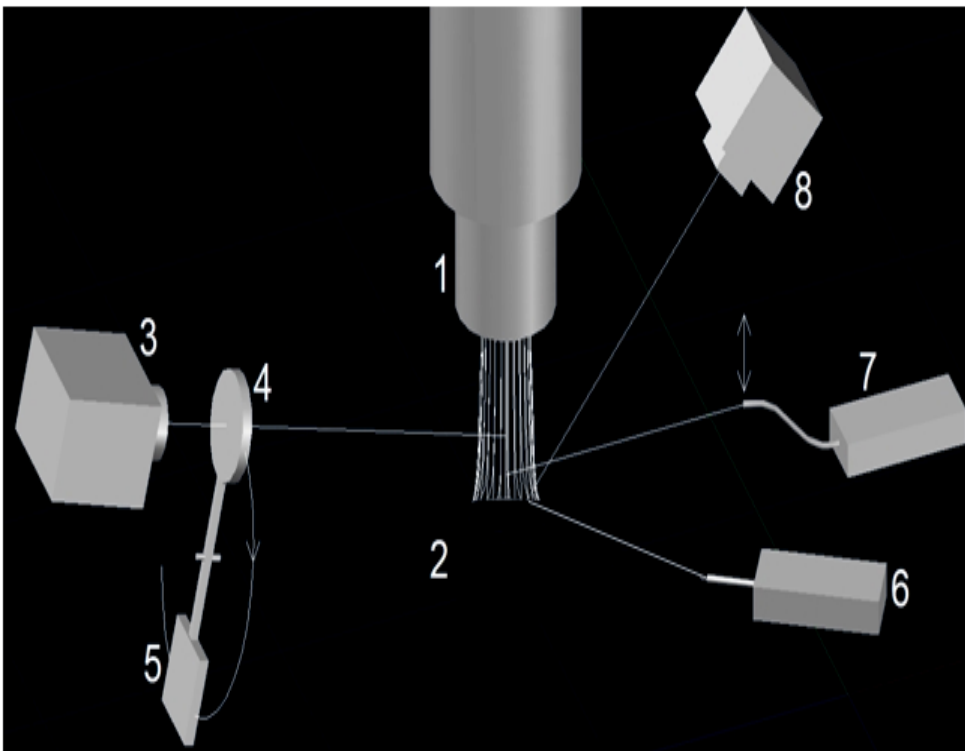
Плазмотрон-катод



- 1 – сопло;
- 2 – медный анодный наконечник;
- 3 – уплотнительное кольцо;
- 4 – изолятор с тангенциальными отверстиями для газа

Плазмотрон-анод

## 4.4. Результаты экспериментальных исследований плазмотронов с расширяющимися каналами выходного электрода, результаты численного моделирования и оптимизация технологических плазмотронов с устойчивыми неконтрагирующими разрядами



### Синхронизованная схема измерений:

1 – плазмотрон; 2 – плазменный поток; 3 – скоростная видеокамера; 4 – интерференционный фильтр; 5 – нейтральный фильтр; 6 – спектрометр AvaSpec 2458; 7 – спектрометр AvaSpec 3648; 8 – скоростная видеокамера.

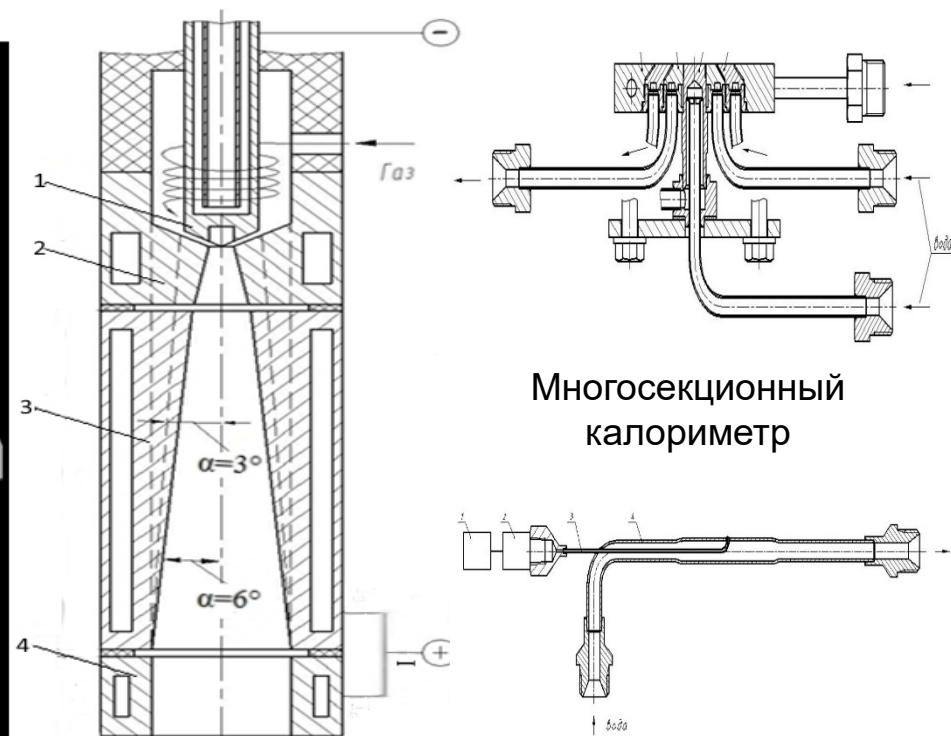


Схема  
экспериментального  
плазмотрона с  
изменяемой геометрией  
разрядного канала:

1 – катод; 2 – МЭВ (сопло); 3,4 – секционированный анод

### Трубка Пито:

1 – источник питания; 2 – токовый датчик; 3 – измерительная трубка; 4 – водоохлаждающая трубка

# 4.5. Создание экспериментального стенда для исследования высокоэнтальпийных плазменных потоков и высокоэнергетического генератора низкотемпературной плазмы мощностью более 1 МВт на основе плазмотрона с расширяющимся каналом выходного электрода для применения в плазмохимических технологиях

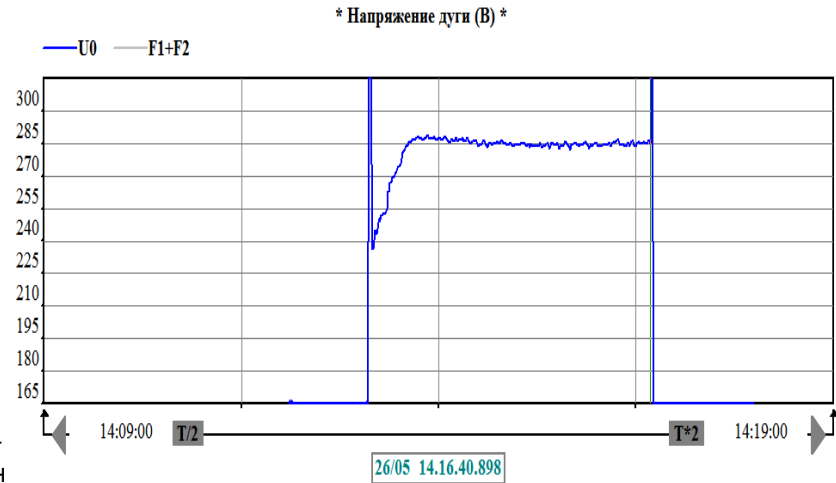
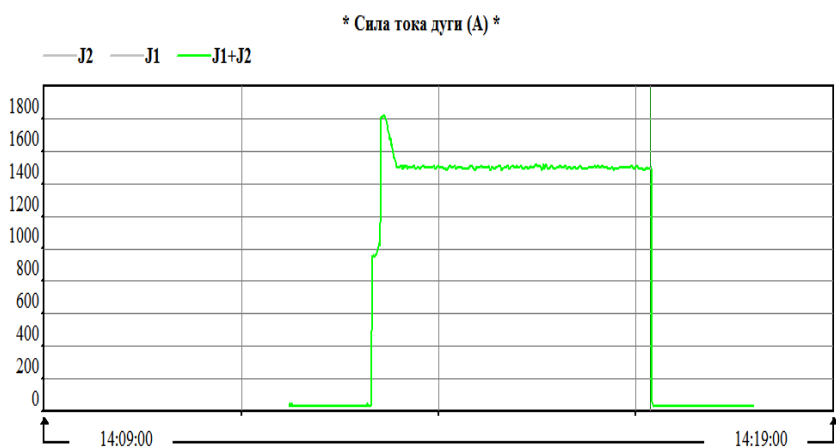
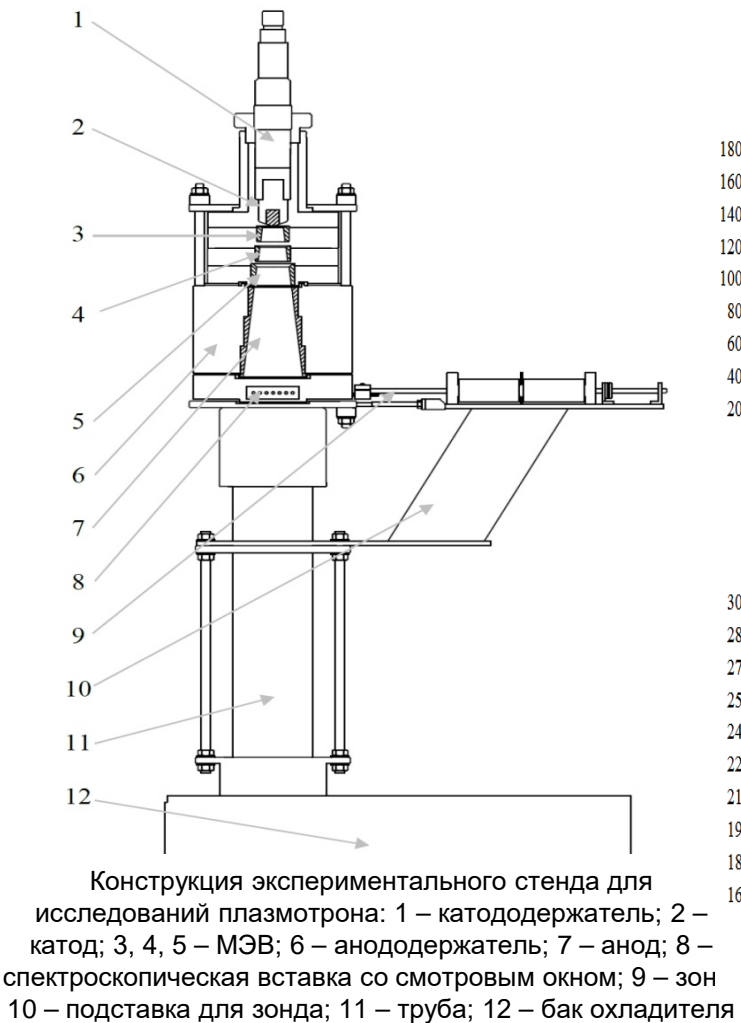
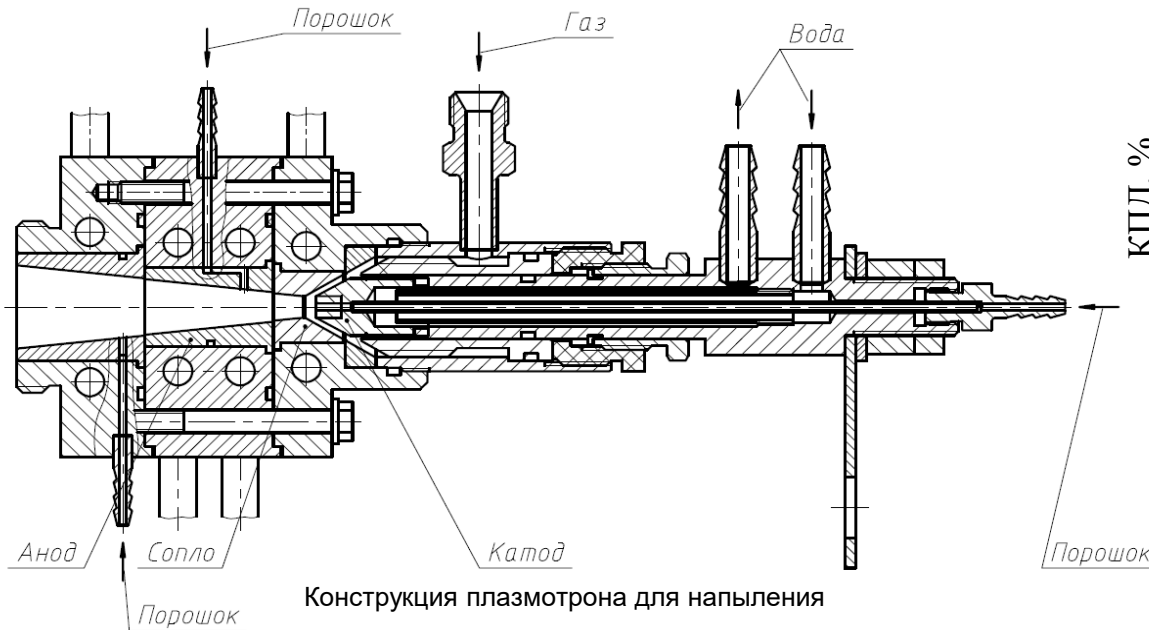


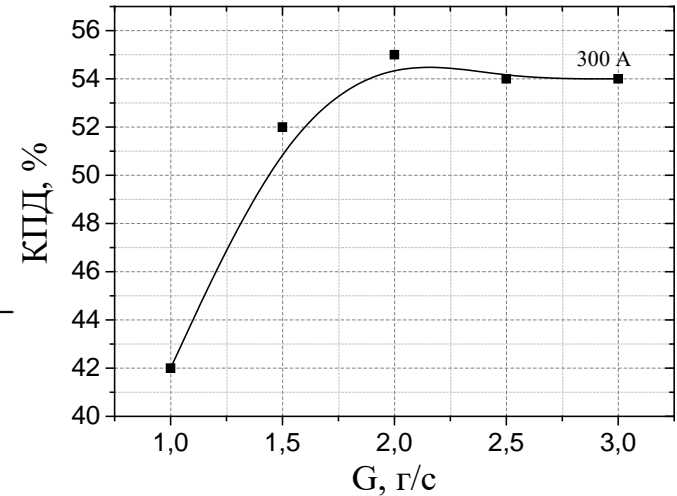
Таблица 1. Оперативные параметры		
Готовность УШС	Есть	
Максимальный ток ИП Jmax	1600	А
Стартовое з.установка J1	4.00	мА
Стартовое з.установка J2	9.00	мА
Время прогрева (выстоя)	3.00	с
Мощность дуги N0	426.90	кВт
Сила тока дуги J0	1500	А
Напряжение дуги U0	284.60	В
Полный расход газа F0	15.13	л/с
Ro газа (1.783-Ar;1.251-N2;1.293-возду)	1.29	кг/м3
***** ИП *****		
И	10	
Мощность N1	142.44	кВт
Сила тока J1	500	А
Ном.ток J1ном	500	А
Давление газа P1	637.54	кПа
Расход газа изм. dP1	8.10	м3/час
Расход газа F1	7.03	л/с
Ном.расход газа F1ном	7.00	л/с
NORMAF1	Вкл	
***** ИП2 *****		
И2	10	
Мощность N2	284.46	кВт
Сила тока J2	1000	А
Ном.ток J2ном	1000	А
Давление газа P2	873.89	кПа
Расход газа изм. dP2	7.98	м3/час
Расход газа F2	8.10	л/с
Ном.расход газа F2ном	8.00	л/с
NORMAF2	Вкл	

Значения параметров и графики при работе плазмотрона с I=1500А

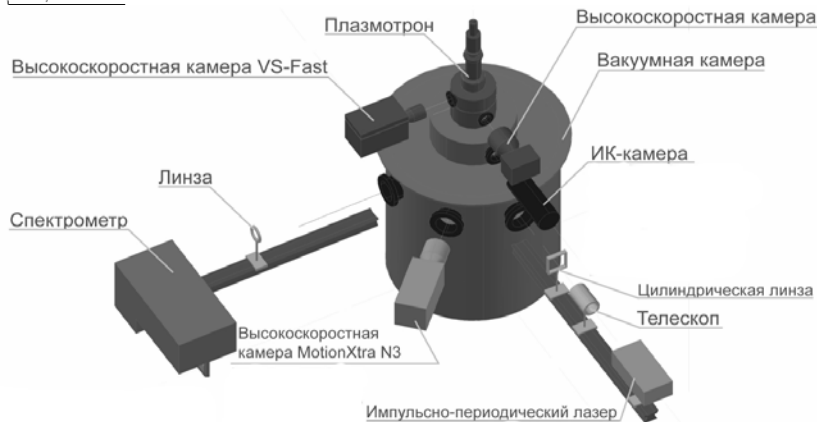
# 4.6. Модернизация экспериментального стенда для плазменных покрытий. результаты исследования гетерогенной плазмы применительно к оптимизации плазменного нанесения покрытий



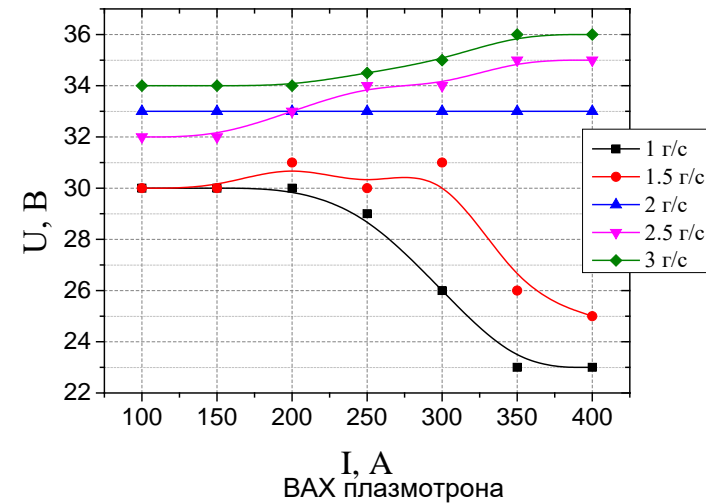
Конструкция плазмотрона для напыления



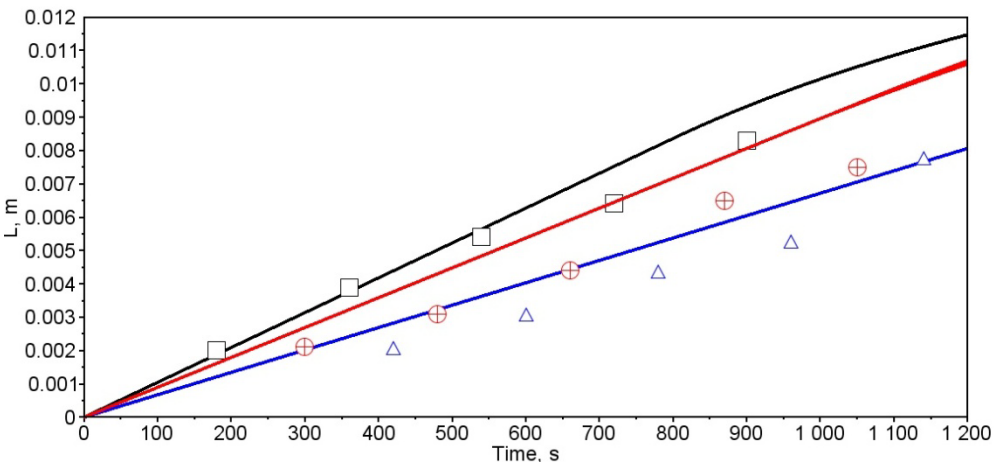
КПД плазмотрона при токе дуги 300 А для различных расходов плазмообразующего газа аргона



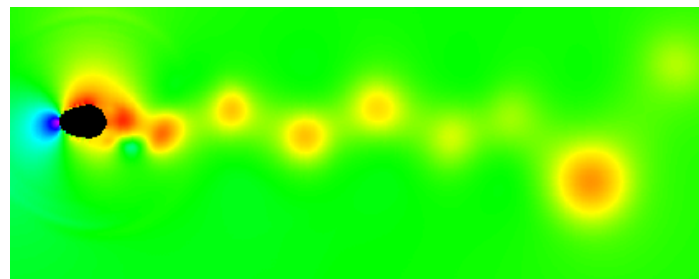
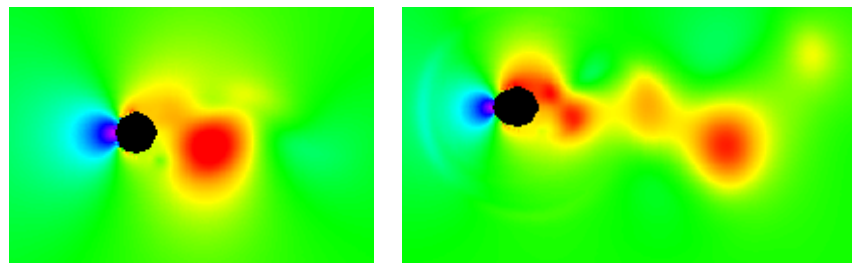
Комплексная система диагностики гетерогенной плазменной струи



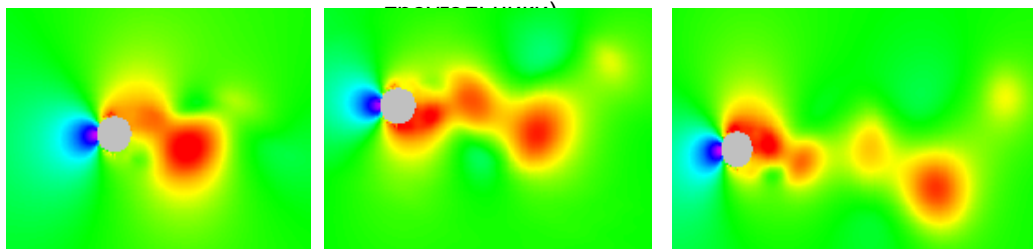
# 4.7. Создание экспериментального стенда и исследование процесса гололедообразования на проводах высоковольтных линий электропередач



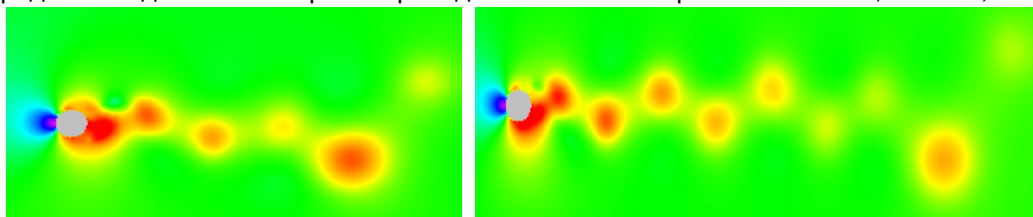
Теоретическое (линии) и экспериментальное (кресты, треугольники, квадраты) исследование скорости нарастания льда. Сравнение проведено для пластин 2 см (черные линии, черные квадраты), 4 см (красная линия, красные кресты в кругах) и 6 см (синяя линия, синие



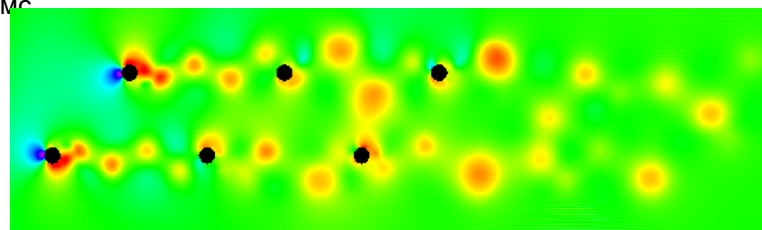
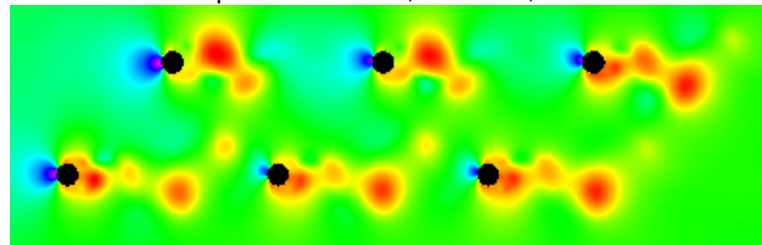
Распределение давления с учетом налипания снега в моменты времени  $t=10$  мс,  $t=100$  мс,  $t=500$  мс



Распределение давления ветра на провод ВЛ в моменты времени  $t=10$  мс,  $t=20$  мс,  $t=100$  мс



Распределение давления ветра на провод ВЛ в моменты времени  $t=1150$  мс и,  $t=500$  мс



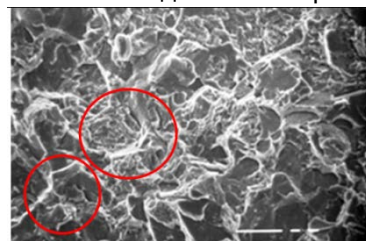
Распределение давления группы проводов при возникновении ветра в моменты времени  $t=300$  мс,  $t=500$  мс



# 4.8. Создание испытательного комплекса для определения характеристик поверхностей изделий после плазменной обработки, структуры и свойства различных сталей после плазменной обработки



Внешний вид излома образца



Область роста трещины (ближе к упрочненной поверхности): квазискол, элементы межзеренного (отмечено красными кружками), вязкие участки, x1800

Марка стали бандажа	Макрошлиф упрочненного гребня	Режим упрочнения	Ширина полосы ЗТВ, мм	Максимальная глубина ЗТВ, мм
2		N=44 кВт V=280 мм/мин G= 1,8 г/с	34	1,80
4		N=42 кВт, V=280 мм/мин, G= 1,8 г/с	36	1,95

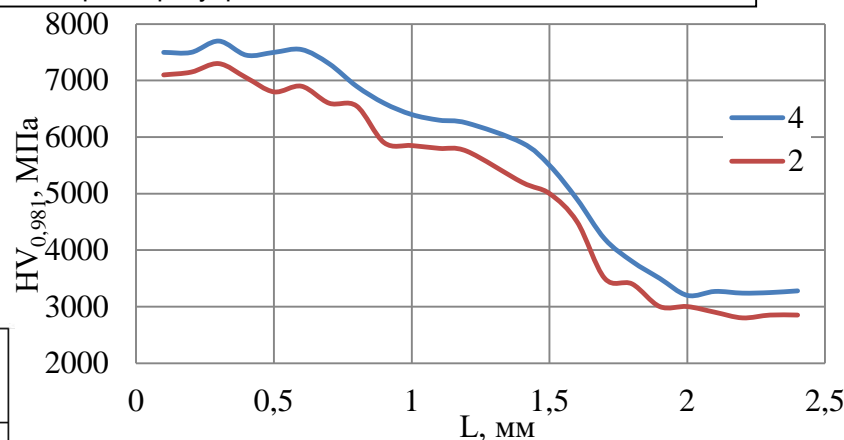
Параметры упрочненного слоя

Марка стали бандажа	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
2	0,60	0,86	0,40	0,015	0,016	0,11	0,04	0,002	0,04	0,04	
4	0,70	0,82	0,42	0,010	0,009	0,23	0,08	0,001	0,03	0,006	
Требование ГОСТ 398-2010	2	0,57 - 0,65	0,60 - 0,90	0,22 - 0,45	< 0,03	< 0,02	< 0,20	< 0,25	< 0,08	< 0,15	< 0,30
	4	0,65 - 0,75	0,60 - 0,90	0,22 - 0,45	< 0,03	< 0,02	0,20 - 0,60	< 0,25	< 0,08	< 0,15	< 0,30

Химический состав сталей бандажей

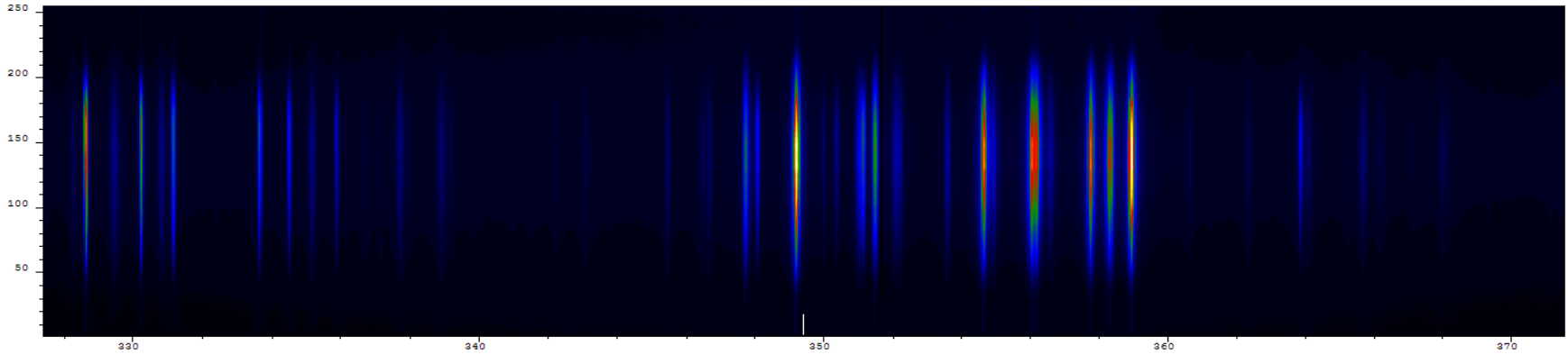
Марка стали бандажа	Расстояние между метками до разрезки, мм	Расстояние между метками после разрезки, мм	Сходимость бандажа, мм
2	99,8	98,6	1,2
4	100,2	77,2	23,0

Результаты исследования остаточных напряжений в бандажах

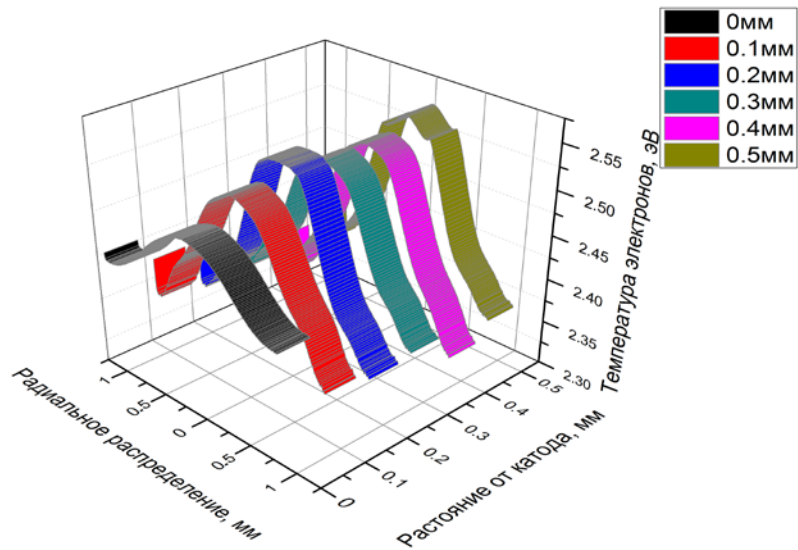


Изменение микротвердости по глубине ЗТВ упрочненной стали марки 2 и 4

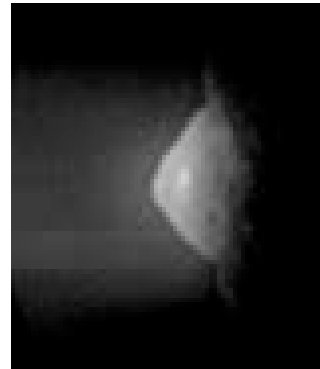
## 4.9. Приэлектродные процессы в генераторе низкотемпературной плазмы с термоэмиссионным катодом



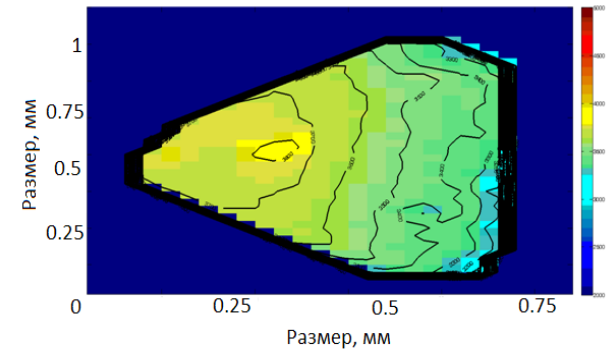
Характерный спектр излучения на расстоянии 0.1мм от катода



Распределение электронной температуры по радиусу и вдоль плазменной струи



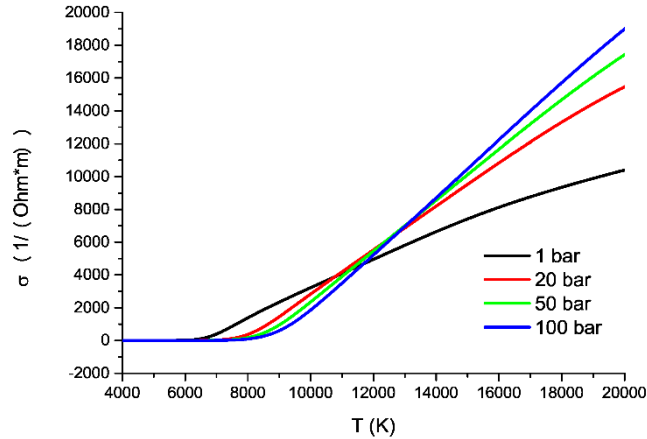
а)



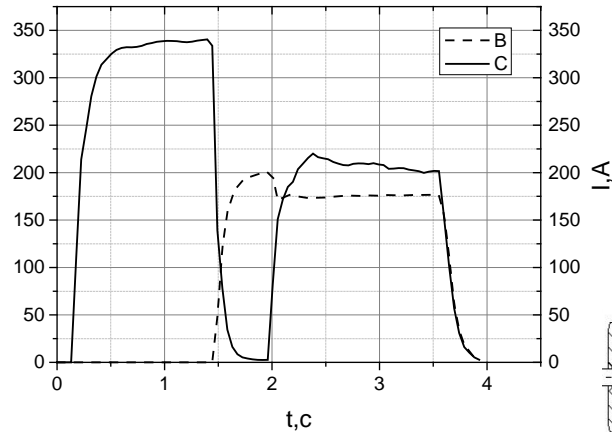
б)

Фото катода а) и поля температур поверхности б)

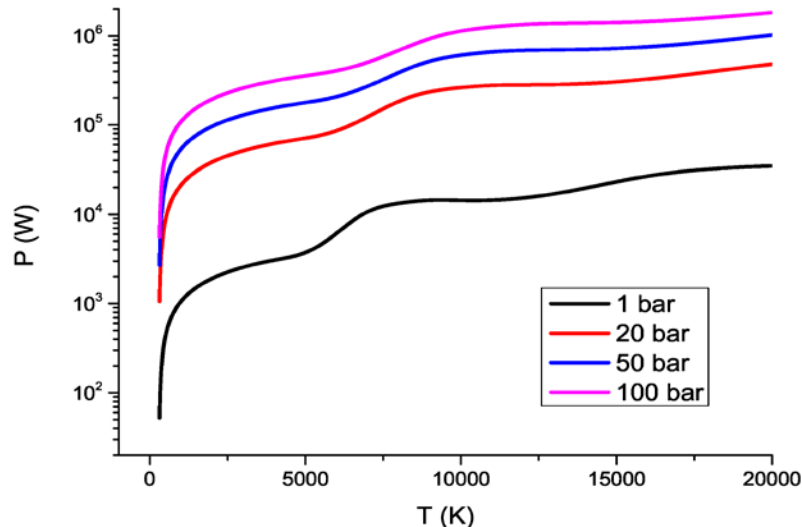
## 4.10. Генератор низкотемпературной плазмы высокого давления



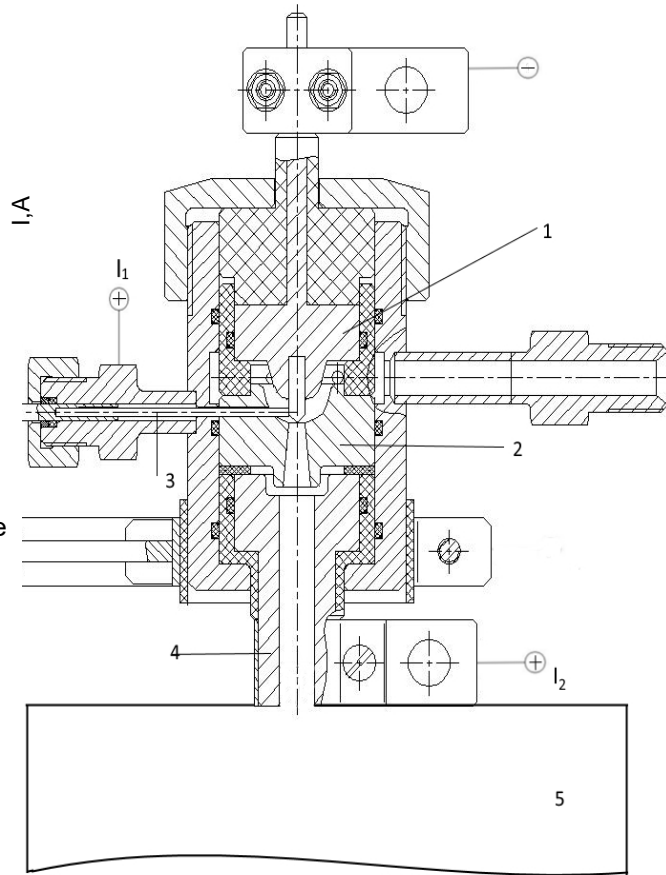
Проводимость чистой азотной плазмы при различных давлениях в температурном диапазоне до 20000 K



Вольт-секундная и ампер-секундная характеристика разряда при 20 атм и расходе газа 7 г/с



Мощность электрической дуги при различных давлениях



Конструкция плазмотрона высокого давления: 1 – катод из меди с вольфрамовым стержнем; 2 – сопло; 3 – вольфрамовый стержень для поджига; 4 – анод; 5 – камера высокого давления;  $I_1$  – ток вспомогательной дуги;  $I_2$  – ток основной дуги

5. Исследования в области гиперзвуковых летательных аппаратов, разработка демонстраторов и предложения для МКС

(работы совместно с РОСКОСМОСМ)

## 5.1. Экспериментальные исследования совместно с ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» Стендовый комплекс для проведения газодинамических испытаний ПВРД

### Испытания ПВРД по схеме присоединенного воздухопровода:



Подогрев воздушного потока

Температура подогрева

Массовый расход

Типы топлив

Время работы

электрический,  
огневой, кауперный;  
до 2600 К;  
до 50 кг/с;  
в различных агрегатных  
состояниях;  
до 1000 с.

### Испытания ПВРД в интеграции с ГЛА при имитации условий, максимально приближенных к натурным:



Имитируемые числа Маха

Имитируемая высота

Система вакуумирования

Ø выхода АДС

Тип АДС

Подогрев воздушного потока

Температура подогрева

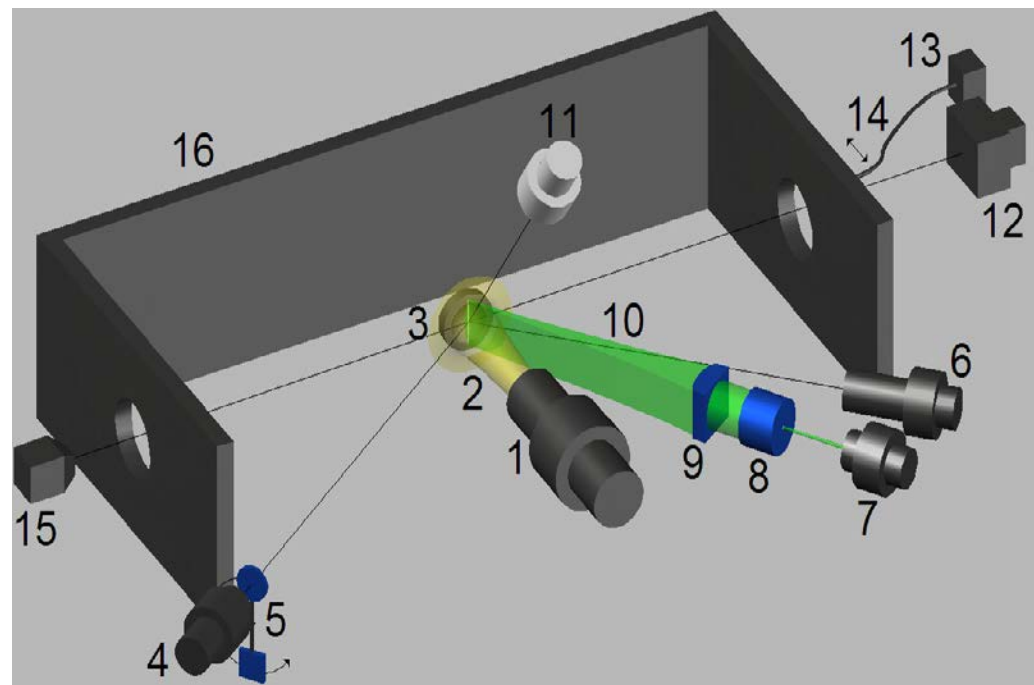
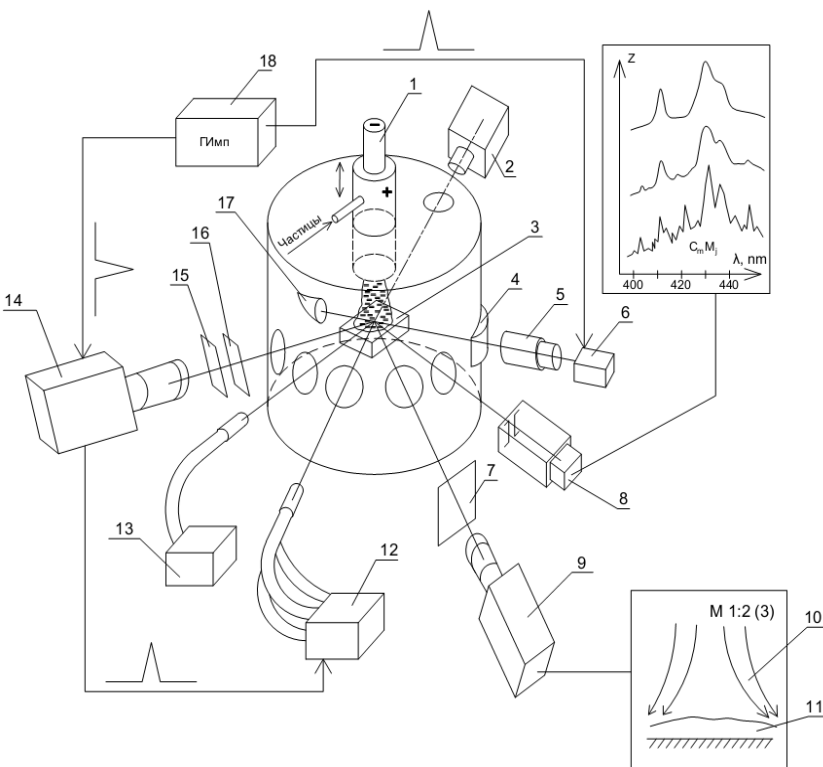
Массовый расход

Время работы

4 – 8 (10);  
выше 30 км;  
эксаустерная,  
(эжекторная);  
1,2; 1,5; (2,0) м;  
профилированное,  
коническое;  
огневой (плазменный);  
до 2600 (3600) К;  
до 100 кг/с;  
до 600 с.



## 5.2. Разработка и создание экспериментального стенда и результаты исследований взаимодействия высокоэнтальпийного потока с поверхностью различных материалов



### Схема комплексного эксперимента:

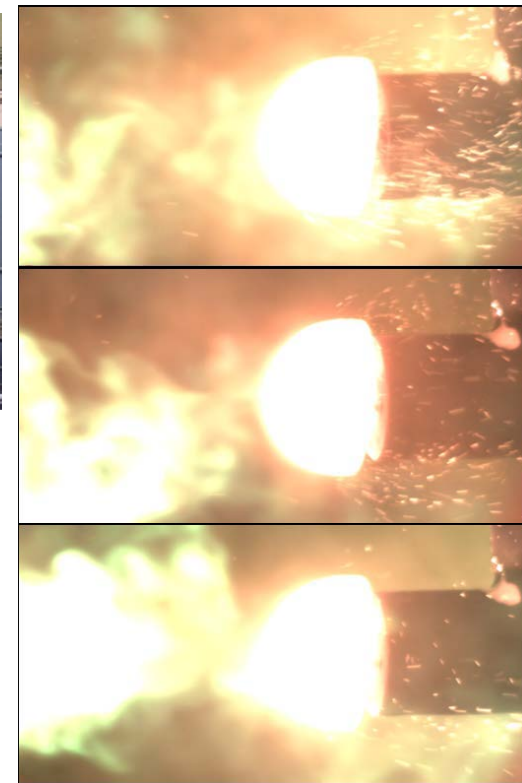
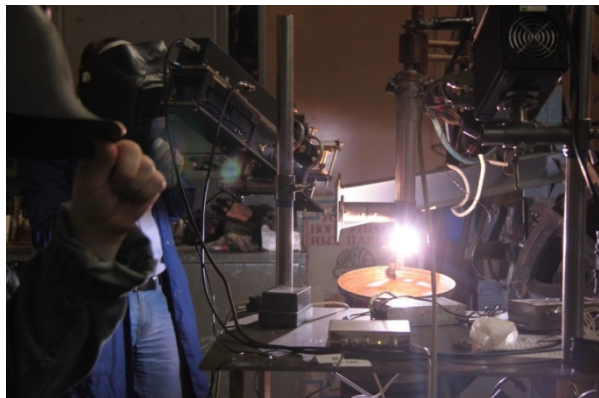
1 – плазмотрон; 2 – высокоскоростной микропирометр; 3 – образец; 4 – цилиндрическая линза; 5 – телескоп; 6 – импульсно-периодический лазер; 7 – светофильтр; 8 – MS-257-Andor, 9 – черно-белая высокоскоростная камера VS-Fast (4/5) $v=1\div 10$  кГц; 10 – треки частиц; 11 – пограничный слой; 12 – 3х каналный спектрометр AvaSpec2048; 13 – одноканальный спектрометр AvaSpec3648; 14 – Video камера Motion Pro; 15 – нейтральный светофильтр; 16 – интерференционный фильтр; 17 – световая “ловушка” для лазерного луча; 18 - система синхронизации (генератор управляющих импульсов).

### Система измерений:

1 – плазмотрон; 2 – плазменная струя; 3 – образец; 4 – черно-белая высокоскоростная камера Phantom Miro M110; 5 – интерференционный и нейтральный светофильтры с программным приводом; 6 – Video камера Motion Pro; 7 – Импульсно-периодический лазер; 8 – телескоп; 9 – цилиндрическая линза, 10 – «лазерный нож»; 11 - высокоскоростной микропирометр; 12 – спектрометр MS-257 с камерой Andor; 13 – 3-х каналный спектрометр AvaSpec2048; 14 – оптоволоконный кабель с микроприводом; 15 – скоростная камера VS-Fast для наблюдения погранслоя; 16 – защитный экран.

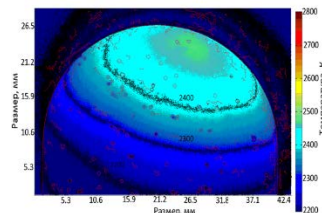
(Лаб. №4.2.2 НИЦ-4 ОИВТ РАН, зав. отд., д.т.н. Тюфтяев А.С., с.н.с., к.ф.-м.н. Гаджиев М.Х., тел. 8(495)485-12-55)

## 5.2. Экспериментальные исследования взаимодействия плазменного потока с образцами ТЗП и моделью ГЛА

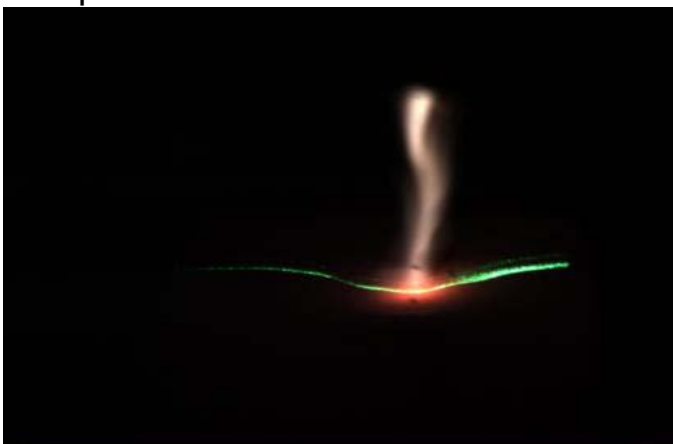
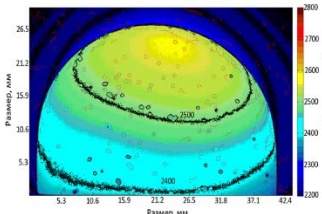


Экспериментальные стенды с плазмотронами 40 кВт и 500 кВт

36с



70с



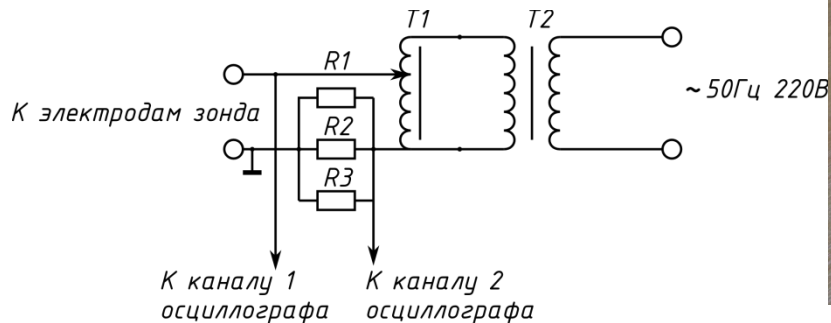
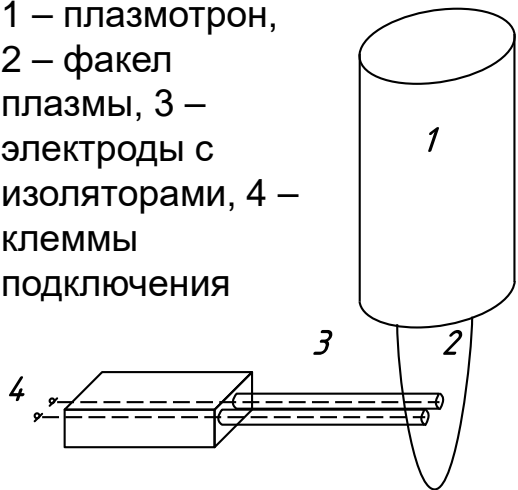
Гаджиев М.Х.,  
Тюфтяев А.С.,

Лазерное профилометрирование,  
 $I=200$  А,  $t=97$ с

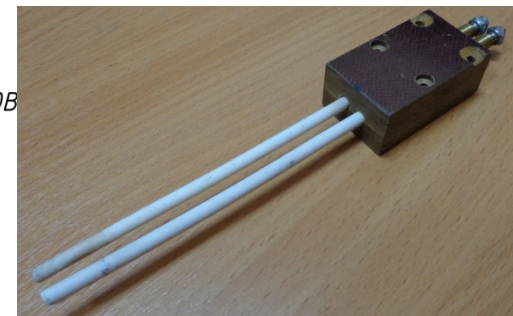
Кадры взаимодействия  
плазменного потока с  
моделью спускаемого  
аппарата в различные  
моменты времени

# 5.3. Результаты испытаний зондов в высокотемпературном высокоэнтальпийном потоке газа для задач образования плазмы при входе космического аппарата в плотные слои атмосферы.

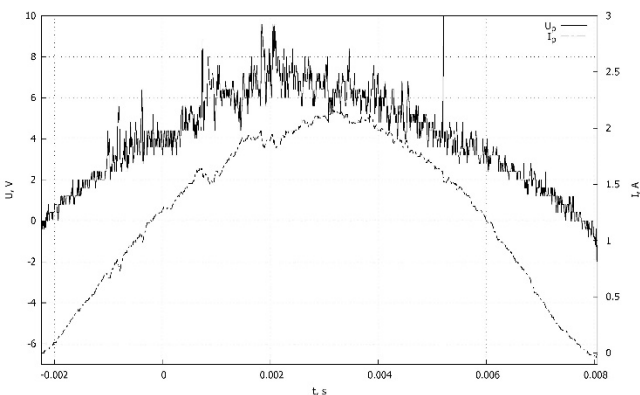
1 – плазмотрон,  
2 – факел  
плазмы, 3 –  
электроды с  
изоляторами, 4 –  
клеммы  
подключения



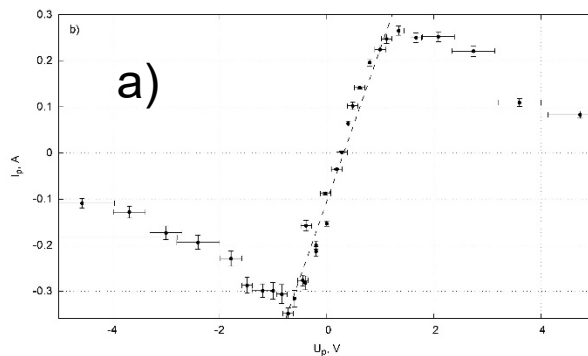
Электрическая схема, питающая двойной зонд



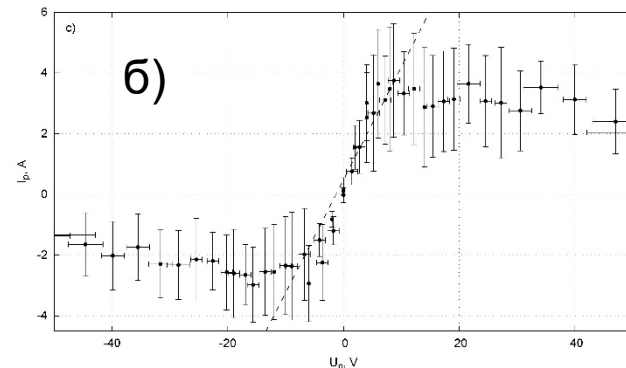
Фотография изготовленной модели двойного зонда



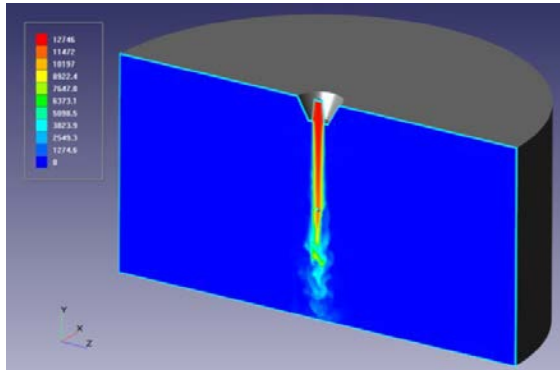
Осциллограмма напряжения  $U_p$  на зонде и тока  $I_p$  через него при размещении зонда в аргонной плазме



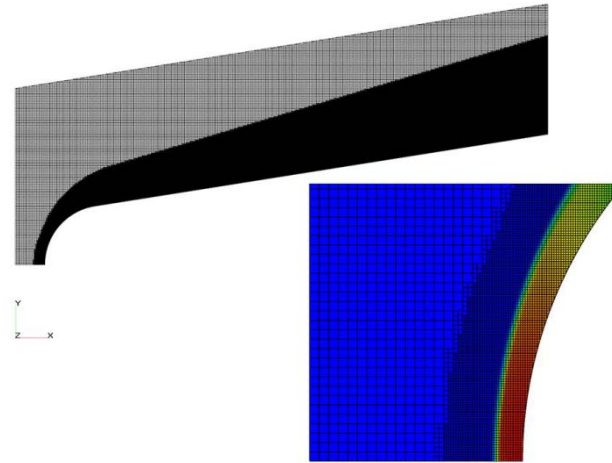
Примеры вольт-амперных характеристик зонда, полученных из осциллограмм. а) аргонная плазма, амплитуда напряжения 10 В, б) азотная плазма, амплитуда 5 В, с) азотная плазма, амплитуда 50 В. Пунктиром показана линейная зависимость, полученная в результате аппроксимации



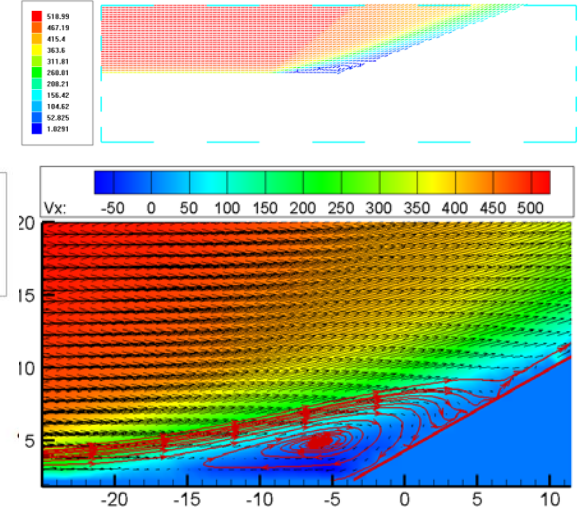
# 5.4. Численное моделирование при создании прикладного программного комплекса на базе "Flow Vision"



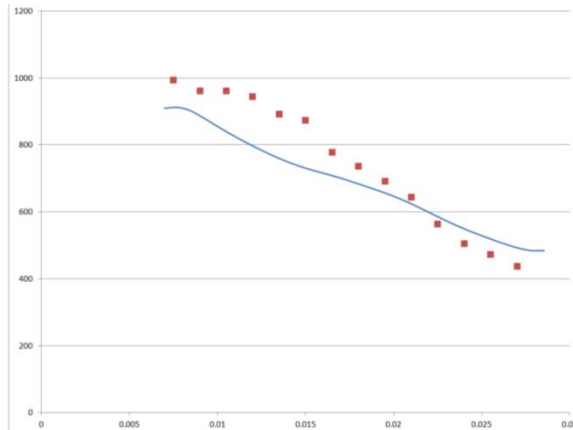
Моделирование плазменной аргоновой струи



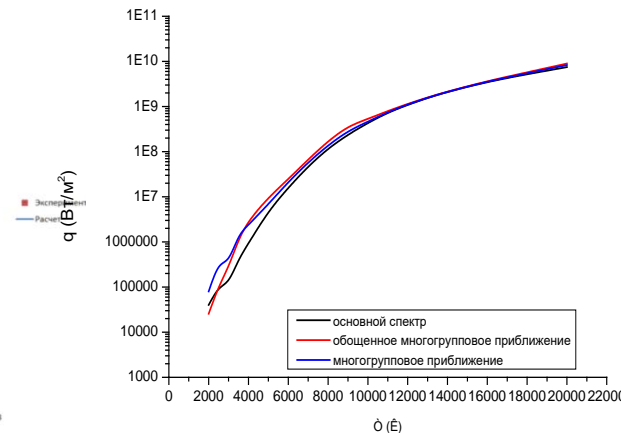
Расчётная сетка и статическое давление на ГЛА АМ-С II



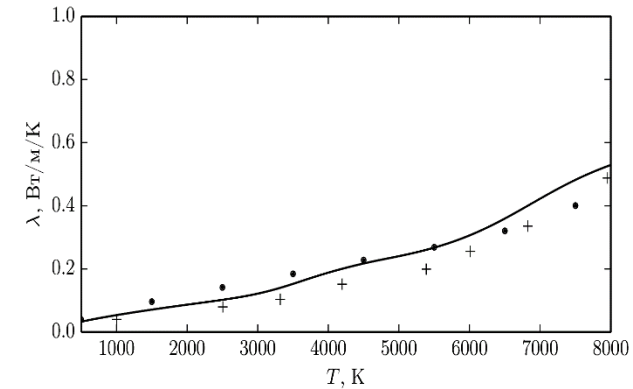
Сравнение моделирования и эксперимента по обтеканию ramпы



Сравнение экспериментальных и расчетных данных распределения скоростей вдоль струи плазменного потока



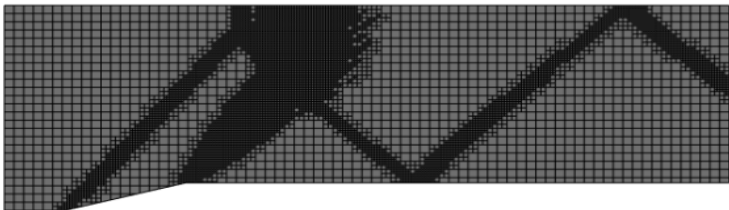
Температурная зависимость интегрального полусферического теплового потока, построенная на основе основного спектра, и методов его осреднения



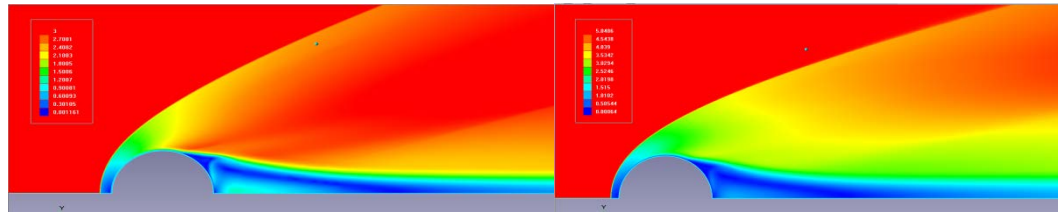
Результаты расчета транспортной теплопроводности воздуха при 1 атм. в сравнении с пакетами «SoVa» («+») и «Cantera» («.»)



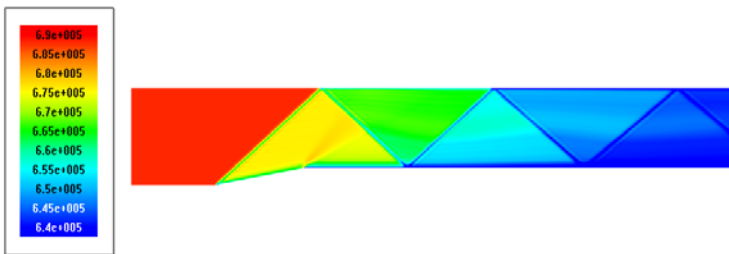
# 5.5. Создание и верификация программы моделирования движения космического аппарата в плотных слоях атмосферы



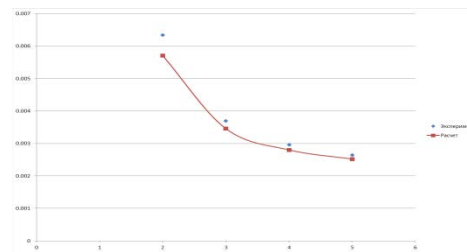
Расчетная сетка, полученная в результате обработки алгоритма локальной адаптации по решению



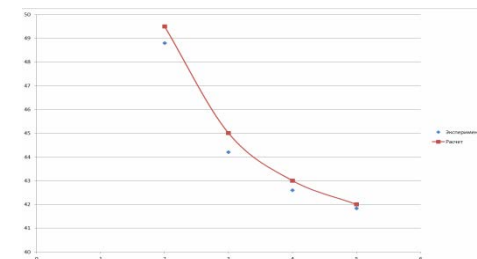
Распределение числа Маха для скорости в набегающем потоке соответствующей значениям 3 и 5 махов.



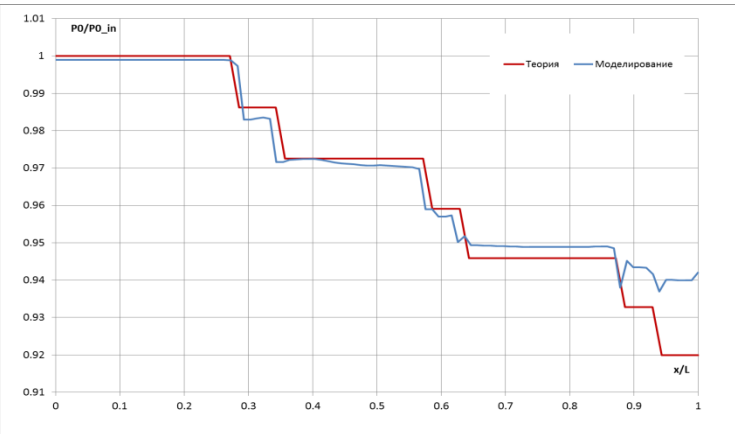
Распределение полного давления ( $P_0 - P_{0,inlet}$ ).



Толщина ударного слоя в критической точке для разных чисел Маха



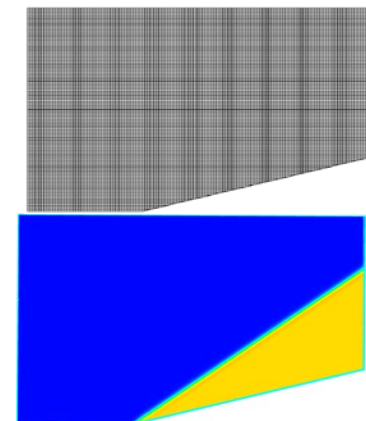
Значения угла пересечения звуковой линии и контура тела.



Распределение полного давления ( $P_0 / P_{0,inlet}$ ) вдоль твердой поверхности.

	Расчёт	Теория	Погрешность расчёта
$M_2$	1.873	1.875	-0.1 %
$P_2$ , Па	250 156	250 000	+0.1 %
$P_{02}$ , Па	1 607 625	1 608 000	-0.025 %
$T_2$ , К	1220.4	1220	+0.4 К
$T_{02}$ , К	2076.6	2076.6	0 К
$\rho_2$	0.7115	0.7110	+0.07 %

Сравнение расчётов с теорией

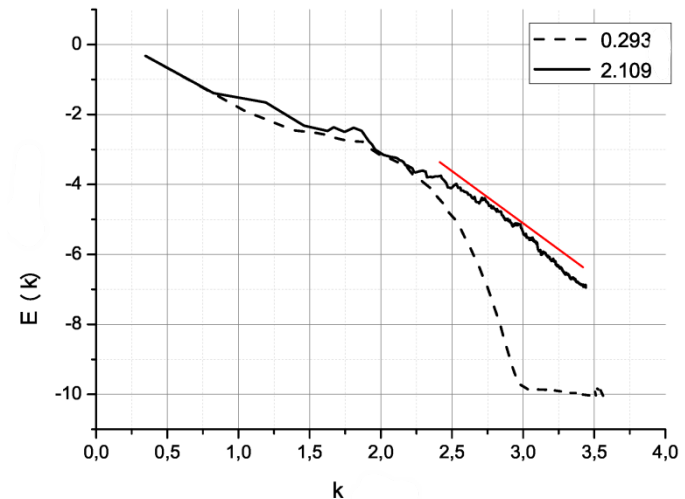
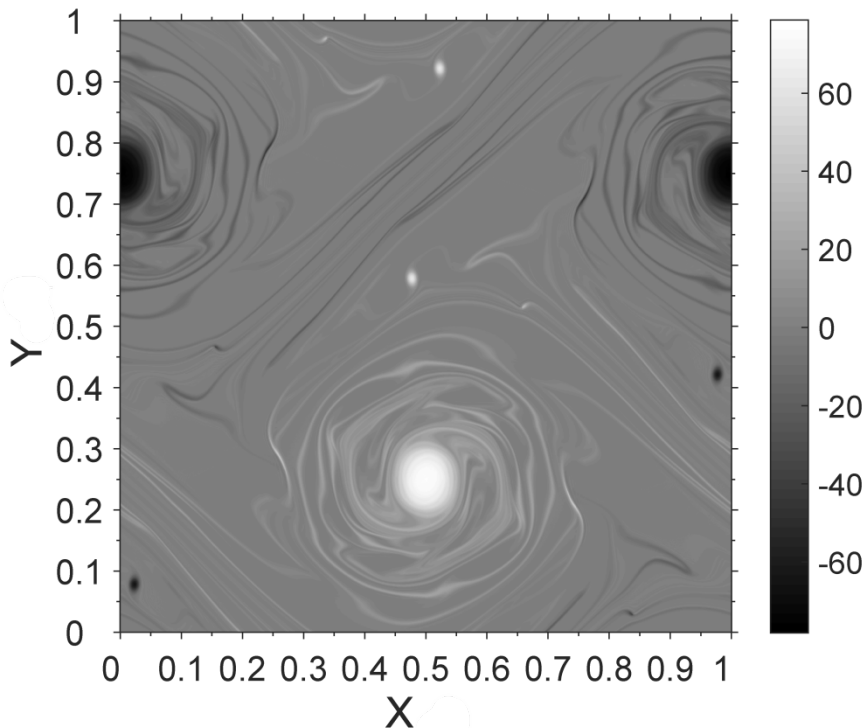
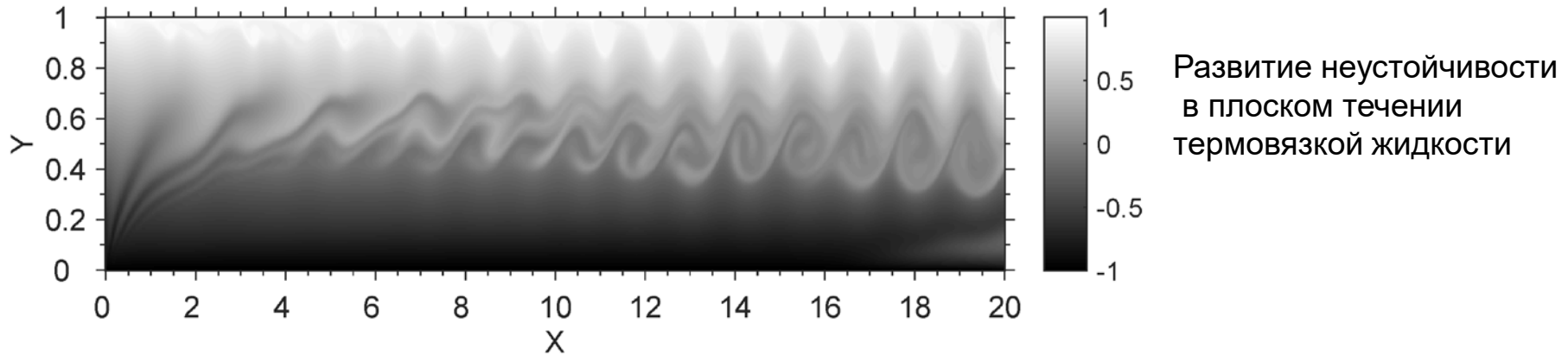


Расчётная сетка и распределение давления в плоскости течения

(Зав. лаб. №4.3.3., к.ф.-м. н. А.А. Аксенов, н.с. Д.В. Савицкий)



## 5.6. Неустойчивость сдвиговых течений в приближении слабой сжимаемости – расчет по схеме КАБАРЕ (предложения для экспериментов на МКС)

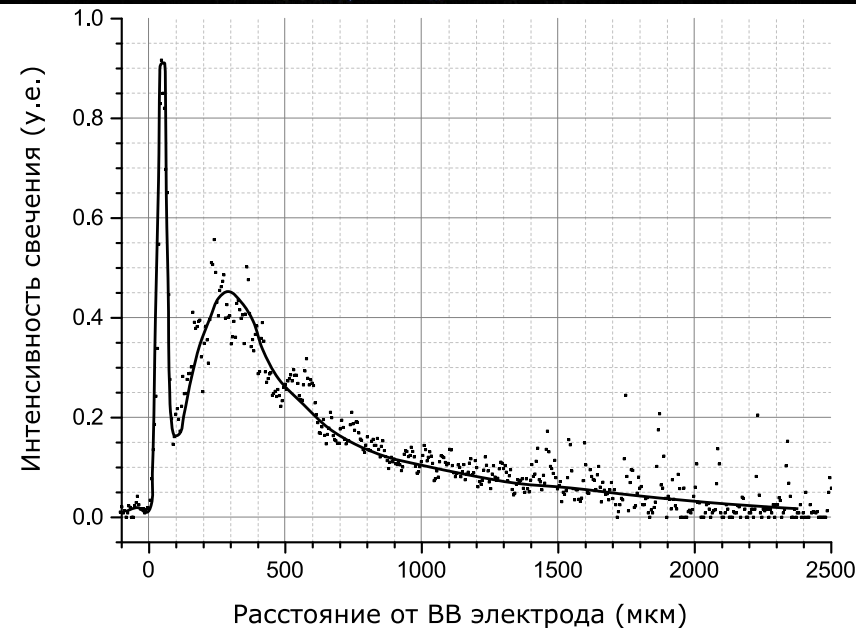
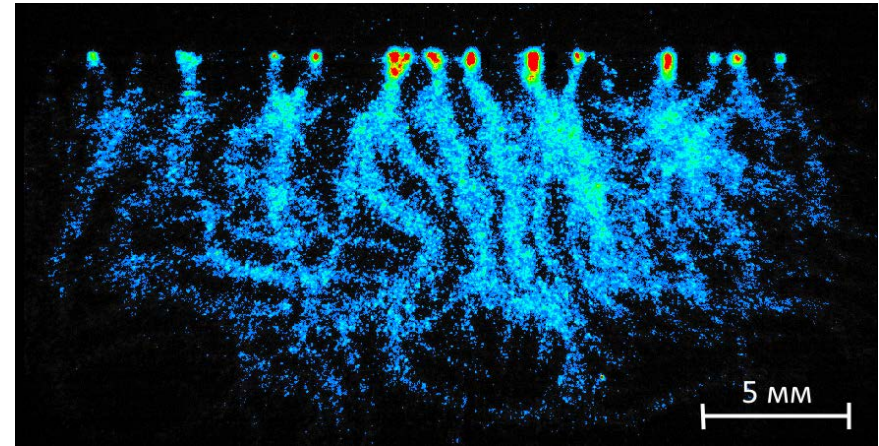


## 5.7. Устойчивость земных микроорганизмов в космической среде МКС к воздействию электрических разрядов и электронно-пучковой плазмы

Программа: IV.4.10 «Фундаментальные проблемы физической и химической механики для экспериментов на МКС»

### Основные результаты:

- Выполнены исследования пространственной структуры барьерного разряда. Показано, что максимальная энергия в разрядном промежутке находится на расстояниях 50-250 мкм от высоковольтного электрода.
- Проведены предварительные исследования воздействия бактерицидного УФ излучения на бактерий вида *Staphylococcus aureus* ( $3 \times 10^5$  КОЕ), находящиеся на поверхности поливинилхлорида.
- Установлено, что при дозе облучения  $1186 \text{ мДж/см}^2$  количество выживших микробных клеток после облучения составило  $4 \times 10$  КОЕ, что соответствует эффективности обеззараживания 99,99%. (Сон Э.Е., Панов В., Василяк Л.М, Печеркин )



## Bose-gas compression

### Euler presentation

$$D_{\mp} r_{\mp} \pm \frac{1}{4} \frac{(r_{+} - r_{-})}{S} D_{\mp} S = 0, \quad p = A_0^2 \rho^{5/3} S^{5/3}$$

$$DS = 0.$$

For Bose gas  $S \rightarrow 0$ ,  $p \rightarrow 0$ ,  $a \rightarrow 0$   
 No compressibility, soft matter,  
 could be autocompressed,  
 density increases to infinity

### Lagrange presentation

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial q} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial q} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} = 0,$$

$$u(0, q) = 0, \quad V(0, q) = V_0, \quad S(0, q) = S_0 q^{\beta},$$

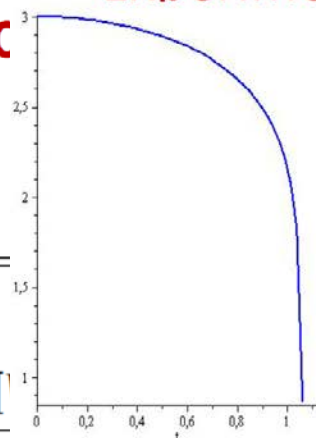
### Solutic

$$S(t, q) = S_0(q)$$

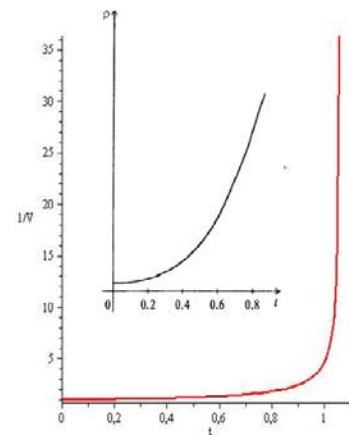
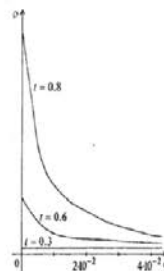
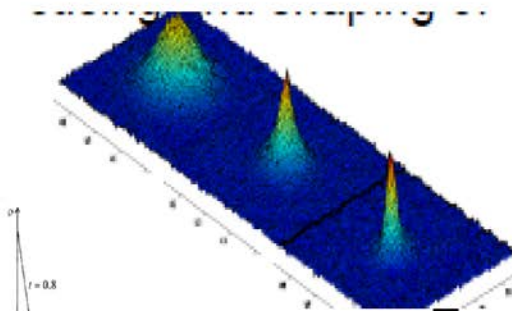
$$u(t, q) = q^{\alpha\beta} U(\xi), \quad V(t, q) = V(\xi), \quad \xi =$$

$$\frac{dU}{d\xi} = \frac{-2A^2 \alpha\beta [V(\xi)]^{-\gamma} + A^2 \alpha\beta (\alpha\beta - 1) \xi [V(\xi)]}{1 - A^2 (1 - \alpha\beta)^2 \xi^2 [V(\xi)]}$$

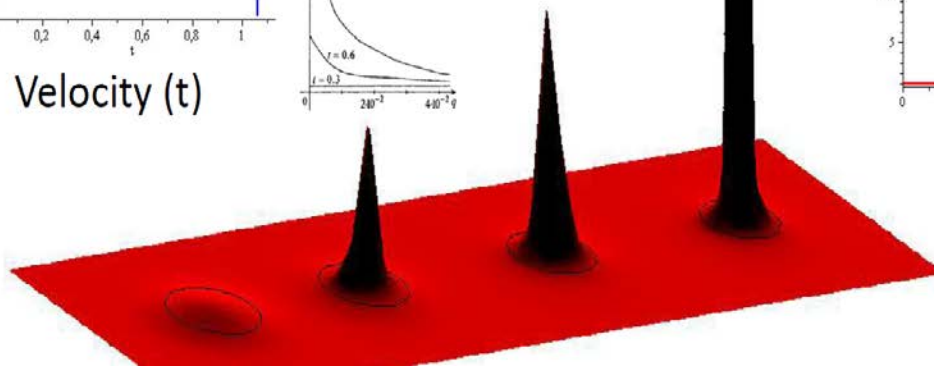
$$\frac{dV}{d\xi} = \frac{\alpha\beta U(\xi) - \frac{A^2 2\alpha\beta (\alpha\beta - 1) [V(\xi)]}{\gamma}}{1 - A^2 (1 - \alpha\beta)^2 \xi^2 [V(\xi)]}$$



Velocity (t)



Density (t)



Experiments (WK) and numerical solution BEC

## 5.8. Предложения для экспериментов на МКС (лаборатория Cold Atom Lab)

(Сон Э.Е., Цурков В.И.)



**Монография Дегтярь В.Г., Сон Э.Е.  
«Гиперзвуковые летательные аппараты»  
ISBN 978-4-8037-0690-8  
Издательство «Янус-К»б 2016, 812 с. иллю**

A decorative graphic on the left side of the slide, featuring stylized grey leaves and swirling patterns.

# **СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**

**Руководитель НИЦ-4  
Сон Э.Е.**